نيل شوبين



تحليل أربعة مليارات سنة
من الحفريات القديمة حتى الحمض النووي

ترجمة: محمد صلاح السيد

تليجرام : هنا سور الأزبكية

صفحة 7

SOME ASSEMBLY REQUIRED

Decoding Four Billion Years of Life from Ancient Fossils to DNA

by Neil Shubin



تجميع الحياة

تحليل أربعة مليارات سنة من الحفريّات القديمة حتى الحمض النووي

نيل شوبين

ترجمة: محمد صلاح السيد





كتاب
تجميع الحياة
المؤلِّف
نيل شوبين

الطَّبعة الأولى: 2024
التَّرقيم الدَّوليّ
978-603-8387-86-3
رقم الإيداع
1445/13820

Copyright © 2020 by Neil Shubin. All rights reserved.

حقوق التَّرجمة العربيَّة محفوظة
© صفحة سبعة للنَّشر والتَّوزيع

E-mail: admin@page-7.com
Website: www.page-7.com
Tel.: (00966) 583210696
العنوان: الجبيل، شارع مشهور
المملكة العربية السعودية





t.me/soramnqraa

جميع آراء المؤلف الواردة في هذا العمل وخلافه تُعبِّر عنه وحده. وليست مسؤولية دار النشر أو أي جهة أخرى متصلة بها من الجهات والهيئات الثقافية التنظيمية أو المانحة وغيرها.

تستطيع شراء هذا الكتاب من متجر صفحة سبعة
www.page-7.com

الفهرس

تجميع الحياة

تحليل أربعة مليارات سنة من الحفريّات القديمة حتى الحمض النووي



سجل في مكتبة
اضغط الصفحة
SCAN



مُقدِّمة

لقد غيَّرت عقود قضيتها في تفليع الحجارة من نظرتي للكائنات الحية. فإذا كنتَ تعرف أين تنظر، يصبح البحث العلمي بحثًا عن كنزٍ عالمي من حفريّات الأسماك ذات الأذرع، والثَّعابين ذات الأرجل، والقردة التي يمكنها المشي منتصبة[1]، وجميعها كائنات قديمة تحكي عن لحظات مهمة في تاريخ الحياة. في كتابي: «**السَّمكة التي بداخلك**» وصفت كيف قادنا التخطيط والحظ أنا وزملائي إلى العثور على تيكتاليك روزي Tiktaalik roseae في أعالي الأراضي القطبية في كندا، وهي سمكة ذات رقبة ومرفقين ومعصمين. وقد سدَّ هذا المخلوق الفجوة بين الحياة في الماء والحياة على الأرض، ليكشف عن اللحظة المهمة التي كان عندها أسلافنا البعيدين أسماكًا. على مدى ما يقارب قرنين، أخبرتنا مثل هذه الاكتشافات كيف يحدث التطور، وكيف تُبنى الأجسام، وكيف أتت إلى الوجود.

(1) من ضمن المراجع التي تتحدث عن: "الأسماك ذات الأذرع، والثعابين ذات الأرجل، والقردة التي يمكنها المشي منتصبة":

N. Shubin et al., "The Pectoral Fin of Tiktaalik roseae and the Origin of the Tetrapod Limb," Nature 440 (2006): 764–71; D. Martill et al., "A Four-Legged Snake from the Early Cretaceous of Gondwana," Science 349 (2015): 416–19; and T. D. White et al., "Neither Chimpanzee nor Human, Ardipithecus Reveals the Surprising Ancestry of Both," Proceedings of the National Academy of Sciences 112 (2015): 4877–84.

لكنّ علم الحفريّات قد وصل إلى لحظة تغيير مهمة، لحظة تزامنت تقريبًا مع بداية مسيرتي المهنية قبل أربعة عقود.

ترعرعت وأنا أقرأ مجلة ناشيونال جيوغرافيك وأشاهد البرامج الوثائقية التلفزيونية، وأدركت منذ سن مبكرة نسبيًّا أنني أرغب في الالتحاق بالرحلات الاستكشافية للبحث عن الحفريّات. وقادني هذا الاهتمام إلى الدِّراسات العليا في جامعة هارفارد، حيث بدأت أولى رحلاتي للبحث عن الحفريّات في منتصف الثمانينيات. ولأنني لم تكن لديّ الإمكانيات للذهاب في رحلات إلى أماكن مثيرة، فقد استكشفت الصخور على جوانب الطرق في جنوب كامبريدج، ماساتشوستس. وعندما عدت من الميدان بعد إحدى هذه الرحلات، وجدت كومة من المقالات العلمية فوق مكتبي. كانت مجموعة الأوراق تلك بمثابة مدخل علمني كيف كان عالم الحفريّات على وشك أن يتغير تغيرًا كبيرًا.

عثر أحد زملائي من طلاب الدِّراسات العليا على مقالات في المكتبة تصف كيف اكتشفت بعض المختبرات الحمض النووي الذي يساعد في بناء أجسام الحيوانات، وكشفت عن الجينات التي تعمل على تكوين: رؤوس الذباب، وأجنحته، وقرون الاستشعار. كانت تلك الحقيقة وحدها مذهلة، ولكن هناك المزيد: كانت نسخ مختلفة من ذات الجينات تكوّن أجسام: الأسماك، والفئران، والبشر. حملت الصور الموجودة في تلك الأوراق لمحات من علم جديد، علم يمكن أن يفسر كيف تتشكل الحيوانات في طور الجنين، وكيف تطورت على مدى ملايين السنين.

كانت تجارب الحمض النووي تعد بالإجابة عن الأسئلة التي كانت في السابق من اختصاص الباحثين عن الحفريّات وحدهم. وفوق ذلك، فقد يصل فهم الحمض النووي إلى الآلية الجينية التي قادت التغييرات التي كنت أسعى إلى اكتشاف تفسيرها بين الصخور القديمة.

مثل الأنواع species المتحجرة من ماضينا، كان يجب عليّ أن أتطور، وإلا سأنقرض. وإذا كان انقراض العالِم يتمثل في فقدانه الأهمية، فإنَّ الغوص العميق في علم الوراثة، وعلم الأحياء التطوري، وعالم الحمض النووي من شأنه أن يبقيني جزءًا من المشهد الفكري. منذ اطلاعي على تلك المقالات العلمية الأولى، أصبح دماغي مثل مختبر مقسوم، أقضي الصيف في المواقع أبحث عن الحفريّات وأعمل بقية العام على الأجنّة وعلى الحمض النووي. وكل من النهجين يعملان في خدمة الإجابة على سؤالٍ واحد: كيف تحدث التغيرات الكبيرة في تاريخ الحياة؟

على مدى العقدين الماضيين وصلت الابتكارات التقنيّة بوتيرة مذهلة. أصبحت أجهزة سَلْسَلة الجينوم[2] الآن قوية جدًّا لدرجة أن مشروع الجينوم البشري الذي استغرق أكثر من عقدٍ وكلَّف مليارات الدولارات، أصبح بالمكان الآن إتمامه في أصيل يومٍ واحد وبأقل من ألف دولار. والسَلْسَلة هي مثالٌ واحد فقط: فالقوة الحاسوبية وتقنيات التصوير تسمح لنا بالنظر داخل الأجنّة وحتى

---

(2) الجينوم Genome: المجموع الجيني في الكائن الحي، كامل الحمض النووي. (المترجم).

رؤية الجزيئات وهي تعمل داخل الخلايا. لقد أصبحت تقنيّة الحمض النووي قوية للغاية، بحيث أصبح من الممكن الآن استنساخ حيوانات متنوعة، مثل: الضفادع والقردة بسهولة، كما أصبح من الممكن زرع جينات البشر أو الذباب داخل الفئران. ويمكن الآن تعديل الحمض النووي لأي حيوان تقريبًا، ما يمنحنا القدرة على محو الشيفرة الوراثية التي تبني أجسام كل أنواع الحيوانات والنباتات تقريبًا وإعادة كتابتها. وأصبح بإمكاننا أن نسأل، على مستوى الحمض النووي: ما مجموعة الجينات التي تجعل الضفدع مختلفًا عن: سمك السلمون المرقط، أو الشمبانزي، أو الإنسان؟

لقد أوصلتنا هذه الثورة إلى لحظة مشهودة، فالصخور والحفريّات، عندما تنضم إلى تقنيّة الحمض النووي، تصبح لديها القدرة على سبر بعض الأسئلة الكلاسيكية التي كافح داروين ومعاصروه من أجل حلها. تكشف التجارب الجديدة عن تاريخ يمتد لمليارات السنين مليء بـ: التعاون، وتغيير الوظائف، والمنافسة، والسرقة، والحرب. وهذا بالضبط ما يحدث داخل الحمض النووي نفسه. فمع استمرار مهاجمة الأوبئة (الفيروسات) له، ومع الحرب بين أجزائه وبعضها، يضطرب الجينوم الموجود داخل كل خلية حيوانية وهو يؤدي وظيفته جيلًا بعد جيل. وكانت نتيجة هذه الديناميّة أعضاء وأنسجةً جديدة، وابتكارات بيولوجية غيرت العالم.

بعد نشوء الحياة، كان الكوكب بأكمله ولمليارات السنين عبارة

عن حديقةٍ ميكروبية. ومنذ حوالي مليار سنة، نشأت من الميكروبات وحيدة الخلية كائنات ذات أجسام. وشهدت بضع مئات أخرى من ملايين السنين نشوء كلِّ شيء من قناديل البحر وحتى البشر. منذ ذلك الوقت، تطورت المخلوقات لتسبح، وتطير، وتفكر، إذ يبشر كل ابتكار بتاليه. استخدمت الطيور الأجنحة والريش للطيران. وأصبحت للحيوانات التي عاشت على اليابسة رئات وأطراف. والقائمة تطول. فمن أسلاف بسيطين، تطورت الحيوانات لتعيش في قاع المحيط، وتسكن الصحاري القاحلة، وتزدهر على قمم أعلى الجبال، وحتى لتمشي على القمر.

أحدثت التحولات العظيمة في تاريخ الحياة نقلات بالجملة في كيفية عيش الحيوانات وكيفية تشكل أجسامها. إن تطور الأسماك إلى كائنات حية برية، وظهور الطيور، وبدايات الأجسام نفسها من كائنات وحيدة الخلية، ما هو إلا عدد قليل من الثورات في تاريخ الحياة. والعلم الذي يبحث فيها مليء بالمفاجآت. إذا كنت تعتقد أن الريش قد ظهر لمساعدة الحيوانات على الطيران، أو أن الرئات والأرجل نشأت لمساعدة الحيوانات على المشي على الأرض، فلست وحدك في هذا الاعتقاد. ولست وحدك المخطئ تمامًا.

يمكن أن يساعد التقدم في هذا العلم في الإجابة على بعض الأسئلة الأساسية التي يطرحها وجودنا: هل كان وجودنا على هذا الكوكب نتيجة المصادفة أم أنَّ التاريخ الذي أوصلنا إلى هذه اللحظة كان حتميًّا على نحوٍ ما؟

لقد كان تاريخ الحياة رحلة طويلة وغريبة وعجيبة من: التجربة

والخطأ، والمصادفة والحتمية، والمنعطفات، والثورات، والابتكار.

وتلك الرحلة، وكيف عرفنا تفاصيلها، هي قصة هذا الكتاب.

الفصل الأول

خمس كلمات

يجد بعض النَّاس هدف حياتهم في المختبر أو الميدان. ولقد وجدت هدفي في شريحةٍ واحدة كانت معروضة أمامي.

في بداية دراستي العليا، حضرت فصلًا دراسيًّا يدرّسه أحد كبار العلماء[3] حول أعظم النجاحات في تاريخ الحياة. كان منهجًا عاصفًا، كأنه مواعدة سريعة مع ألغاز كبيرة في التطور. وكان موضوع المناقشة في كل أسبوع هو أحد أشكال التحول التطوري. وفي إحدى المحاضرات الأولى، عرض الأستاذ رسمًا بسيطًا يظهر ما كنا نعرفه آنذاك، عام 1986، عن التَّحول من الأسماك إلى الحيوانات البرية. في الجزء العلوي من الرَّسمة كانت هناك سمكة وفي الجزء

---

(3) كان ذلك الأستاذ هو الرَّاحل فاريش آ. جنكيز الابن الذي أصبح مرشدي. والذي تعاون معي في الرحلات الاستكشافية التي أدت إلى اكتشاف التيكتاليك. والرَّسمة التي ألهمتني وجدت طريقها إلى كتاب صغير رائع عن التحولات العظيمة في تطور الفقاريات: ليونارد رادينسكي، تطور تصميم الفقاريات (شيكاغو: مطبعة جامعة شيكاغو، 1987)، الشَّكل 9.1، ص. 78. كان فاريش صديقًا مقربًا لرادينسكي، وهو الذي شارك معه مسودات الرسوم التوضيحية للكتاب التي رسمها شارون إيمرسون، ليستخدمها في المنهج. ومن قبيل المصادفة، كان رادينسكي هو سلفي في رئاسة قسم التشريح في جامعة شيكاغو. لم أكن أعلم في أثناء الدِّراسات العليا أن الرسم الذي استخدمه سيلهمني للسير على خطاه بعد عقود.

السفلي كانت حفريّة لحيوان برمائي أوليّ. وسهم يتجه من السَّمكة إلى البرمائيّ. كان السهم، وليس السَّمكة، هو ما أثار انتباهي. نظرت إلى ذلك الشَّكل، وحككت رأسي. سمكة تمشي على الأرض: كيف يمكن أن يحدث ذلك؟ بدا كأنه لغز علمي من الدَّرجة الأولى يستحق أن أبني عليه حياتي المهنية. كان حبًّا من النَّظرة الأولى. وهكذا بدأت أربعة عقود من الرحلات الاستكشافية إلى كل من القطبين، وقارات عدة، للبحث عن الحفريّات التي تكشف كيف حدث ذلك.

ومع ذلك، وعندما حاولت شرح مسعاي لأقاربي وأصدقائي، كنت أقابل في كثيرٍ من الأحيان بنظرات مُتألمة وأسئلة مهذبة، فتحويل السَّمكة إلى حيوان بري يعني تطوير هيكل عظمي جديد، يحمل أطرافًا للمشي بدلًا من زعانف للسباحة. وفوق ذلك، كان لا بد من ظهور طريقة جديدة للتنفس، باستخدام الرئتين بدلًا من الخياشيم. لذلك أيضًا، كان لا بد من تغيير التَّغذية والتَّكاثر، فتناول الطعام ووضع البيض في الماء يختلف تمامًا عما يحدث على اليابسة. أي: ينبغي أن تتحول تقريبًا كل أنظمة الجسم في وقتٍ واحد. فما فائدة وجود أطراف للمشي على اليابسة إذا كان الحيوان لا يستطيع: التنفس، أو التغذي، أو التكاثر؟

إنَّ العيش على اليابسة لا يحتاج ابتكارًا واحدًا فحسب، بل يحتاج تفاعل المئات من الابتكارات. وتظهر نفس الإشكالية في كل من آلاف التحولات الأخرى في تاريخ الحياة، من نشأة الطيران والمشي على قدمين إلى نشأة الأجسام والحياة نفسها. بدا أنَّ مسعاي محكوم

بالفشل منذ البداية.

هناك اقتباس مشهور للكاتبة المسرحية ليليان هيلمان[4] يتضمن الحل لهذه المعضلة. في وصفها لحياتها - من إدراجها على القائمة السوداء للجنة مجلس النواب للأنشطة المناهضة لأمريكا في الخمسينيات من القرن الماضي، إلى أسلوب حياتها القاسي - قالت ذات مرة: «لا شيء، بالطبع، يبدأ في الوقت الذي تعتقد أنه بدأ فيه». بهذه العبارة، وصفت عن غير قصد أحد أقوى المفاهيم في تاريخ الحياة، وهو المفهوم الذي يفسر أصل معظم الأعضاء والأنسجة، وكل جزءٍ من الحمض النووي في جميع المخلوقات على كوكب الأرض.

بدأت بذور هذه الفكرة في علم الأحياء نتيجة عمل أحد أكثر الشخصيات تدميرًا لذاته في تاريخ العلم الذي يصدق فيه القول: إنه غيّر المجال بأخطائه.

— لفهم معنى الاكتشافات الحديثة في الجينوم، نحتاج إلى العودة إلى عصر مُبكر من الاستكشاف. كانت إنجلترا الفيكتورية بوتقة

---

(4) يظهر اقتباس ليليان هيلمان في سيرتها الذاتية، امرأة غير مكتملة: مذكرات (نيويورك: بنجوين، 1972). الترجمة البيولوجية للمفاهيم التي عبَّرت عنها هي التكيف المسبق والملاءمة المسبقة. نُوقشت الفروق الدقيقة بينهما في مقالة ستيفن ج. جولد واليزابيث فربا، "التكيف المسبق - مصطلح مفقود في علم الشَّكل".

Stephen J. Gould and Elisabeth Vrba, "Exaptation—A Missing Term in the Science of Form," Paleobiology 8 (1982): 4–15.

انظر أيضًا دبليو جيه بوك، "التكيف المسبق والمسارات التطورية المتعددة".

W. J. Bock, "Preadaptation and Multiple Evolutionary Pathways," Evolution 13 (1959): 194–211.

تحتوي كل من الورقتين المهمتين أمثلة عدّة.

للأفكار والاكتشافات التي عاشت طويلًا. وثمة شاعرية في فكرة أنَّ اكتشاف آلية عمل الحمض النووي في تاريخ الحياة يعتمد على أفكار تطورت في عصر لم يكن يعرف الناس فيه حتى أن الجينات موجودة.

وُلِد سانت جورج جاكسون ميفارت[5] (1827-1900) لأبوين إنجيليين مُتعصبين في لندن. ارتقى والده من خادم إلى امتلاك أحد الفنادق الكبرى في المدينة. وقد منحت مكانة ميفارت الأب لابنه الفرصة في أن يصبح من طبقة النبلاء، وأسبغت عليه امتياز اختيار المهنة التي يشاء. ومثل معاصره تشارلز داروين، وُلِد ميفارت يلازمه شغف للطبيعة. فعندما كان طفلًا، كان يجمع: الحشرات، والنباتات، والمعادن، وكثيرًا ما يُدوّن ملاحظات ميدانية غزيرة ويبتكر مخططات للتصنيف. بدا أن ميفارت مقدّر له العمل في التاريخ الطبيعي.

ثم تدخلت الفكرة المهيمنة على حياته الشخصية، وهي الصراع مع السلطة. في سن المراهقة، أصبح ميفارت غير مرتاح بشكلٍ مُتزايد لعقيدة عائلته الإنجيلية. فتحول إلى الكاثوليكية الرومانية، ما أثار استياء والديه الشديد. وكان لهذه الخطوة الجريئة بالنسبة لشاب يبلغ من العمر ستة عشر عامًا عواقب غير متوقعة. كان ولاء ميفارت الجديد للكنيسة الكاثوليكية يعني أنه لن يتمكن من

(5) هذه المعلومات عن سانت جورج جاكسون ميفارت مقتبسة من كتاب جي دبليو جروبر، ضمير في صراع: حياة سانت جورج جاكسون ميفارت.

J. W. Gruber, A Conscience in Conflict: The Life of St. George Jackson Mivart (New York: Temple University Publications, Columbia University Press, 1960).

الالتحاق بأكسفورد أو كامبريدج؛ لأن الالتحاق بالجامعات الإنكليزية كان ممنوعًا على الكاثوليك في ذلك الوقت. ولأنه لم يتمكن من الالتحاق بأي برنامج لدراسة التاريخ الطبيعي، ذهب إلى الخيار الوحيد المتبقي - وهو دراسة القانون في أنزال القانون[6]، حيث لم يكن دين المرء يمثل عائقًا. وأصبح ميفارت محاميًا.

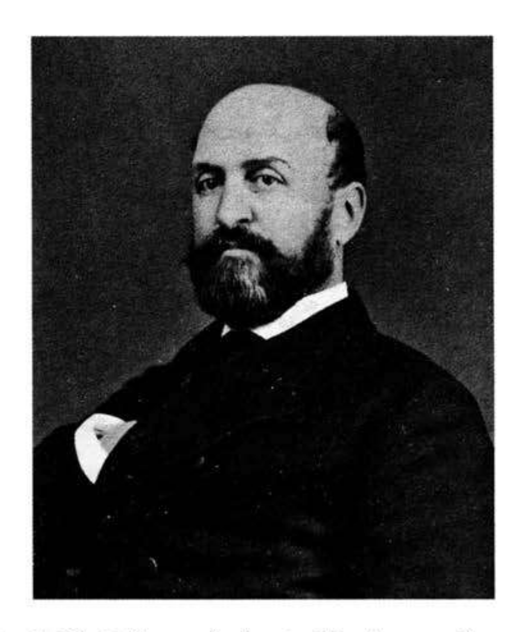
ليس من الواضح ما إذا كان ميفارت قد مارس المحاماة أو لا، لكن بقي التاريخ الطبيعي شغفه. ومستغلًا مكانته بِعَدِّه من النبلاء، دخل المجتمع العلمي الراقي، حيث بنى علاقات مع الشخصيات المهمة في ذلك الوقت، أبرزها توماس هنري هكسلي (1825-1895) الذي سرعان ما أصبح مُدافعًا بارزًا عن أفكار داروين في المجال العام. كان هكسلي نفسه عالم تشريح مقارن متمكّن، جمع حوله كادرًا من المتدربين المتحمسين. وأصبح ميفارت قريبًا من الرجل العظيم، حيث كان يعمل في مختبره، بل كان يشارك في تجمعات عائلة هكسلي. تحت وصاية هكسلي، أنتج ميفارت أعمالًا مؤثرة، وإن كانت وصفية في الغالب، في علم التَّشريح المقارن للرئيسيات. وتظل تلك الأوصاف التفصيلية للهياكل العظمية مفيدة حتى يومنا هذا. وعندما نشر داروين طبعته الأولى من كتاب «**أصل الأنواع**» في عام 1859، عد ميفارت نفسه من المؤيدين لفكرة داروين الجديدة الذي جاء ربما نتيجة تأثره بحماس هكسلي.

لكن، وكما كان مع عقيدته الإنجيلية في شبابه، نمت لدى ميفارت

---

(6) أنزال القانون أو أنزال المحكمة Inns of Court: هي الآن الاتحادات المهنية للمحامين في إنجلترا وويلز. وفي الأصل كانت حانات أو أنزال يجتمع فيها المحامون لممارسة أعمالهم، وكان يأتي إليها من أراد تعلم المهنة من المحامين. (المترجم).

شكوكٌ قوية حول أفكار داروين واعتراضات فكرية على الفكرة الداروينية القائلة بالتغيّر التدريجي، ثم بدأ في التعبير عن أفكاره علنًا، باعتدال في البداية، ثم بقوة أكبر. وحشد الأدلة الداعمة لأفكاره المنشقة، فألف ردًّا على كتاب أصل الأنواع. وإذا كان قد بقي لديه أي أصدقاء من بين رفاقه القدامى في عالم التاريخ الطبيعي، فقد فقدهم بكلمةٍ واحدة غيرها من عنوان كتاب داروين: «**خلق الأنواع**».[7]



سانت جورج جاكسون ميفارت الذي استطاع أن يسيء إلى كل الأطراف على جانبي جدليّة التطور

---

(7) كتاب ميفارت "**خلق الأنواع**" الذي نُشر عام 1871 متاح الآن على الإنترنت على الرابط الآتي: https://archive.org/details/a593007300mivauoft.
والطبعة السادسة من كتاب داروين حول أصل الأنواع مُتاحة أيضًا على الإنترنت على الرابط الآتي: https://www.gutenberg.org/files/2009/2009-h/2009-h.htm.

عندها بدأ ميفارت في التنغيص على الكنيسة الكاثوليكية أيضًا. فكتب في دوريات الكنيسة أن الولادة البتولية وعقيدة عصمة الكنيسة هي أشياء بعيدة عن التصديق مثلها مثل أفكار داروين. ومع نشر كتاب «**خلق الأنواع**»، أصبح ميفارت عمليًّا مطرودًا من العلم. كما أدت كتاباته إلى أن طردته الكنيسة الكاثوليكية رسميًّا قبل ستة أسابيع من وفاته في عام 1900.

يمنحنا تحدي ميفارت لداروين نافذة على المعارك الفكرية الضارية في إنجلترا الفيكتورية، ويصوغ العقبة التي لا يزال الكثير من الناس يواجهونها مع أفكار داروين. افتتح ميفارت هجومه بالإشارة إلى نفسه بصيغة الغائب، مستخدمًا لغة تهدف إلى إثبات مصداقيته بِعَدِّه متفتح العقل: «لم يكن ميالًا في الأصل إلى رفض نظرية داروين الجذّابة».

بدأ ميفارت عرض حجته بفصل كبير يوضح فيه ما عدّه خطأ داروين القاتل، واصفًا إيّاه بأنّه: «عجز الانتخاب الطبيعي عن تفسير المراحل البدائية للتراكيب النافعة». العنوان طويل، لكنه يلخص قضية محورية: تصور داروين أن التطور يتألف من مراحل وسيطة لا حصر لها من نوعٍ إلى آخر. ولكي ينجح التطور، يجب أن تكون كل مرحلة من هذه المراحل الوسيطة قابلة للتكيف وأن تزيد من قدرة الفرد على الازدهار. بالنسبة لميفارت، المراحل الوسيطة كثيرًا ما لا تبدو معقولة. خذ نشأة الطيران، على سبيل المثال. ما الذي يمكن أن تقدمه المرحلة الأولى من نشأة الأجنحة من فائدة؟ أطلق عالم الحفريّات الراحل ستيفن جاي جولد على هذه المشكلة اسم

«معضلة 2٪ من جناح»[8]: إذ يبدو أن جناحًا صغيرًا بدائيًّا في أسلاف الطيور ليست له أي فائدة على الإطلاق. في مرحلةٍ ما، قد يكون كبيرًا بما يكفي لمساعدة الحيوان في التحويم، لكن لا يمكن استخدام جناح ضئيل في أي شكل من أشكال التحليق.

عرض ميفارت حالة تلو الأخرى بدت فيها المراحل الوسيطة غير معقولة. للأسماك المفلطحة عينان على جانب واحد من الجسم، وللزرافات أعناق طويلة، وبعض الحيتان لها أمشاط ترشيح، والعديد من الحشرات تُحاكي لحاء الأشجار، وما إلى ذلك. ما الفائدة التي يمكن أن تقدمها الإزاحات الجزئية الصغيرة للعين، أو الاستطالات الصغيرة في الرقبة، أو الاختلافات الدقيقة في اللون؟ وماذا عن فك لا يحتوي إلا أمشاط ترشيح ضئيلة لإطعام حوت كامل؟ يبدو أنَّ التطور يتألف من عددٍ لا يُحصى من الطرق المسدودة بين نقاط البداية والنهاية لأي تحول كبير.

كان ميفارت من أوائل العلماء الذين لفتوا الانتباه إلى ملاحظة أنَّ التحولات الكبرى في التطور لا تتضمن التغيير في عضو واحد، بل يجب أن تتغير مجموعات كاملة من السمات في جميع أجزاء الجسم بشكلٍ متناغم. ما فائدة الأطراف المتطورة للمشي على اليابسة إذا لم تكن لدى المخلوق رئتان ليتنفس الهواء؟ أو خذ مثالًا آخر: تأمل نشوء الطيران. يحتاج التحليق إلى العديد من الابتكارات المختلفة،

(8) رأي جولد حول "معضلة 2% من جناح" موجود في ستيفن جاي جولد، "ليس بالضرورة جناحًا".

Stephen Jay Gould, "Not Necessarily a Wing," Natural History (October 1985).

كـ: الأجنحة، والريش، والعظام المجوفة، والأيض العالي. سيكون من غير المجدي لمخلوق ذي عظام ثقيلة مثل: عظام الفيل، أو أيض بطيء مثل: السَّمندل أن يطور أجنحةً. إذا كان ينبغي أن تتغير الأجسام بأكملها لكي يحدث أي تحول عظيم، وأن تتغير العديد من السمات في وقتٍ واحد، فكيف يمكن أن تحدث التحولات الكبرى تدريجيًّا؟

طوال قرن ونصف القرن منذ نشرها، كانت أفكار ميفارت بمثابة المعيار للعديد من الانتقادات الموجهة للتطور. لكنها بالرغم من ذلك، كانت حينها بمثابة الحافز لواحدة من أفكار داروين العظيمة.

رأى داروين في ميفارت ناقدًا مهمًّا بحق. كان قد نشر الطبعة الأولى من كتابه أصل الأنواع عام 1859، وظهر كتاب ميفارت الكبير في عام 1871. وفي الطبعة السادسة النهائية لكتاب أصل الأنواع، المنشورة في عام 1872، أضاف داروين فصلًا جديدًا للرد على منتقديه، ومن بينهم ميفارت.

تماشيًا مع تقاليد النقاش الفيكتوري، افتتح داروين كلامه بالقول: «لقد جمع عالم الحيوان المتميز، السيد سانت جورج ميفارت، مؤخرًا كل الاعتراضات التي تقدمت بها أنا والآخرون ضد نظرية الانتخاب الطبيعي، كما طرحتها أنا والسيد والاس، وقد وضحها بفن وقوة جديران بالإعجاب». وتابع: «وعندما تُساق على هذا النحو، فهي تمثل مجموعة هائلة».

ثم أسكت انتقادات ميفارت بعبارة واحدة أتبعها بأمثلة وفيرة من عنده: «جميع اعتراضات السيد ميفارت سننظرها، أو نظرناها، في

هذا الكتاب. النقطة الجديدة الوحيدة التي يبدو أنها حيّرت العديد من القُراء هي أن الانتخاب الطبيعي غير قادر على تفسير المراحل البدائية للتراكيب النافعة. ويرتبط هذا الموضوع ارتباطًا وثيقًا بموضوع تدرُّج السمات الذي غالبًا ما يكون مصحوبًا **بتغيير في الوظيفة**».

من الصعب أن نبالغ في تقدير الأهمية الكبيرة لتلك الكلمات الثلاث الأخيرة بالنسبة للعلم. فهي تحتوي بذور طريقة جديدة لرؤية التحولات الكبرى في تاريخ الحياة.

كيف يمكن ذلك؟ كالعادة، تمنحنا الأسماك بعض الأفكار.

نَفَس من الهواء النقي:

عندما غزا نابليون بونابرت مصر عام 1798، أحضر مع جيشه ما كان أكثر من: السفن، والجنود، والأسلحة. ولأنه رأى نفسه عالمًا، فقد أراد تحويل مصر من خلال مساعدتها في السيطرة على نهر النيل، وتحسين مستوى المعيشة، وفهم تاريخها الثقافي والطبيعي. وقد ضم فريقه بعضًا من كبار المهندسين والعلماء في فرنسا. وكان من بينهم إتيان جيفروي سانت هيلير (1772-1844).

كان سانت هيلير، وهو في السادسة والعشرين من عمره، أعجوبة علمية[9]. كان بالفعل رئيسًا لقسم علم الحيوان في متحف التاريخ الطبيعي في باريس، وكان مقدرًا له أن يصبح واحدًا من أعظم علماء

---

(9) روايتي لحياة سانت هيلير وعمله مُستمدة من:

H. Le Guyader, Geoffroy Saint-Hilaire: A Visionary Naturalist (Chicago: University of Chicago Press, 2004), and from P. Humphries, "Blind Ambition: Geoffroy St-Hilaire's Theory of Everything," Endeavor 31 (2007): 134–39.

التَّشريح في كل العصور. حتى في العشرينات من عمره، أبرز تفوقه بأوصافه التَّشريحية للثدييات والأسماك. وبين حاشية نابليون، وُكلت له المهمة المبهجة المتمثلة في تشريح العديد من الأنواع التي وجدتها فرق نابليون في: الوديان، والواحات، والأنهار في مصر، وتحليلها، وتسميتها. وكانت إحداها سمكة قال عنها رئيس متحف باريس فيما بعد: إنها تكفي لتبرير حملة نابليون المصرية بأكملها. لكن بالطبع، من المرجح أن جان فرانسوا شامبليون الذي فك رموز الهيروغليفية المصرية باستخدام حجر رشيد كان سيعترض على هذا الوصف.



GEOFFROY S^T HILAIRE

إتيان جيفروي سانت هيلير، الأعجوبة العلمية

بدا المخلوق من الخارج بـ: قشوره، وزعانفه، وذيله سمكةً عاديةً. تطلبت الأوصاف التَّشريحية في أيام سانت هيلير تشريحًا معقدًا، وفي

كثير من الأحيان كان ذلك بمساعدة فريق من الفنانين لالتقاط كل التفاصيل المهمة على مطبوعات حجرية جميلة وملونة في كثير من الأحيان. يحتوي الجزء العلوي من الجمجمة على فتحتين في الخلف قُرب الكتف. كان ذلك غريبًا بما يكفي، لكن المفاجأة الحقيقية كانت في المريء. في العادة، يعد تتبع المريء في تشريح السَّمكة أمرًا عاديًّا إلى حدٍّ كبير؛ لأنه عبارة عن أنبوب بسيط يصل من الفم إلى المعدة. لكن ذلك المريء كان مختلفًا، فقد كان يوجد كيس هوائي على كل من جانبيه.

كان هذا النوع من الأكياس معروفًا للعلم في ذلك الوقت. فقد وُصفت مثانة السباحة في عددٍ من الأسماك المختلفة، حتى أن غوته (الشاعر والفيلسوف الألماني) علّق عليها ذات مرة. توجد تلك الأكياس في الأنواع التي تعيش في المحيطات وفي المياه العذبة، وتمتلئ بالهواء وتفرغ منه، ما يوفر القدرة على الطفو المتعادل عندما تجوب الأسماك أعماقًا مختلفة من الماء. مثل الغواصة التي تطرد الهواء بعد نداء: «اغطس... اغطس... اغطس»، يتغير تركيز الهواء في مثانة السباحة، ما يساعد الحيوان في الانتقال في أعماق وضغوط مائية مختلفة.

كشف المزيد من التَّشريح عن المفاجأة الحقيقية: كانت تلك الأكياس الهوائية متصلة بالمريء عبر قناة صغيرة. وكان لتلك القناة الصغيرة، وهي عبارة عن وصلة صغيرة تربط بين كيس الهواء والمريء، تأثير كبير في تفكير سانت هيلير.

أكدت ملاحظة هذه الأسماك في البرية بالضبط ما استنتجه سانت

هيلير من تشريحها، فقد كانت تعُبّ الهواء، وتسحبه عبر الفتحات الموجودة في مؤخرة رؤوسها. حتى أنها أظهرت شكلًا من أشكال امتصاص الهواء المتزامن، حيث تستنشق مجموعات كبيرة منها في تناغم. وغالبًا ما تصدر مجموعات من هذه الأسماك المُخَنِفِرة، والمعروفة باسم كثيرات الزعانف أو البشير bichirs، غالبًا ما تصدر أصواتًا أخرى، مثل: الدقات أو الأنّات في أثناء ابتلاعها الهواء، على الأرجح بحثًا عن التزاوج.

فعلت الأسماك شيئًا آخر غير متوقع. تنفست الهواء. كانت الأكياس مليئة بالأوعية الدموية، ما يدل على أن الأسماك كانت تستخدم ذلك النظام لتوصيل الأوكسجين إلى مجرى الدم. والأهم من ذلك أنها تتنفس من خلال الفتحات الموجودة في أعلى رؤوسها، وتملأ الأكياس بالهواء، بينما تبقى أجسامها في الماء.

تلك سمكة تملك خياشيمَ فضلًا عن عضو يسمح لها بتنفس الهواء. وغني عن القول: إن هذه السَّمكة أصبحت مشهورة.

بعد عقود قليلة من الاكتشاف المصري، أُرسل فريق نمساوي في رحلة لاستكشاف نهر الأمازون احتفالًا بزواج أميرة نمساوية. جمع الفريق: الحشرات، والضفادع، والنباتات أنواعًا جديدة لتسميتها على شرف العائلة. ومن بين الاكتشافات سمكة جديدة، كانت مثل أي سمكة، لها خياشيم وزعانف. ولكن بداخلها كانت هناك أيضًا شبكة أوعية دموية واضحة تمامًا: لم يكن كيسًا هوائيًّا بسيطًا، بل عضوًا مملوءًا بالفصوص، وإمدادات الدم، والأنسجة التي تميِّز ما يشبه رئات الإنسان الحقيقية. كان ذلك مخلوقًا يربط بين شكلين

عظيمين من الحياة: الأسماك والبرمائيات. وللتعبير عن هذا الارتباك، أطلق المستكشفون عليها اسم ليبيدوسيرين بارادوكسا Lepidosiren paradoxa - وهي كلمة لاتينية تعني: «السَّمندل المتناقض ذو الحراشف»[10].

سمّها ما شئت - أسماكًا أو برمائياتٍ أو أي شيء بينهما - كانت تلك المخلوقات تملك زعانف وخياشيم لتعيش في الماء ولكنها تملك أيضًا رئات لتتنفس الهواء. ولم تكن مجرد اكتشاف منفرد. ففي عام 1860، اكتُشفت سمكة أخرى ذات رئات في كوينزلاند بأستراليا.[11] كان لتلك السَّمكة أيضًا مجموعة مميزة جدًّا من الأسنان. كانت الأسنان تشبه قاطعة بسكويت مسطحة، وكانت معروفة من السجل الحفريّ في نوعٍ انقرض منذ فترة طويلة، وهو حيوان يُدعى: «دبيب الحوت» Ceratodus وُجد في الصخور منذ أكثر من 200 مليون سنة. كان المعنى الضمني واضحًا: الأسماك ذات الرئة التي تتنفس الهواء كانت أرضية وكانت تعيش على كوكب الأرض منذ مئات الملايين من السنين.

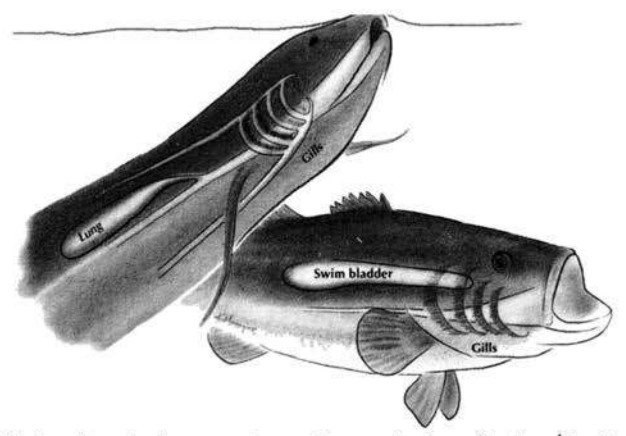
(10) وتُعرف في العربية بالسَّمكة الرئوية الأمريكية الجنوبية والدَّفافة أمريكية الجنوبية. (المترجم).

(11) الوصف الأصلي للسمك الرئوي الأسترالي موجود في:

A. Gunther, "Description of Ceratodus, a Genus of Ganoid Fishes, Recently Discovered in Rivers of Queensland, Australia," Philosophical Transactions of the Royal Society of London 161 (1870–71): 377–79.

تاريخ الاكتشاف موجود في:

A. Kemp, "The Biology of the Australian Lungfish, Neoceratodus forsteri (Krefft, 1870)," Journal of Morphology Supplement 1 (1986): 181–98.



تملك الأسماك الرئوية رئات وخياشيم. وتستخدم الرئات مثل رئاتنا لتتنفس الهواء عندما لا يلبي محتوى الأوكسجين في الماء احتياجاتها. وتملك الأسماك الأخرى مثانة سباحة تساعدها في الطفو.

يمكن أن تؤدي الملاحظات الشاذة إلى تغيير قواعد اللعبة في كيفية رؤيتنا للعالم، فقد نتج عن ملاحظة رئات الأسماك ومثانات السباحة جيلًا من العلماء المهتمين باستكشاف تاريخ الحياة من خلال النظر في الحفريّات والكائنات الحية على السواء. تُظهر الحفريّات كيف كانت تبدو الحياة في الماضي البعيد، وتكشف الكائنات الحية عن كيفية عمل الهياكل التَّشريحية، وكيفية تطور الأعضاء من البيضة إلى البلوغ. وكما سنرى، فهي طريقة فعّالة.

كان الربط بين دراسة الحفريّات ودراسة الأجنّة مجالًا مثمرًا للبحث عند علماء الطبيعة الذين تبعوا داروين. وكان باشفورد دين (1867–1928) يتمتع بمنزلة غير عادية في الأوساط الأكاديمية، فهو الشخص الوحيد على الإطلاق الذي شغل منصب أمين متحف متروبوليتان للفنون، والمتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي الذي يقع

على الجانب الآخر مباشرة عبر سنترال بارك. كان لديه شغفان في الحياة، حفريّات الأسماك ودروع المعارك. فأسس مجموعة الدروع والمعروضات في متحف متروبوليتان، وفعل الشيء نفسه بالنسبة لمجموعات الأسماك في متحف التاريخ الطبيعي. وكان فيه من الغرابة ما يناسب شخصًا لديه مثل هذه الاهتمامات.[12] لقد صمّم درعه الخاص، بل ارتداه في شوارع مانهاتن.

عندما لم يكن يرتدي دروع القرون الوسطى، كان باشفورد دين يدرس الأسماك القديمة. كان يعتقد أنه في مكانٍ ما من تحول الجنين من بيضة إلى بالغ، كانت هناك إجابات على ألغاز التاريخ وآلية تحدُّر الأسماك الحالية من الأنواع السالفة. وبمقارنة أجنّة الأسماك بالحفريّات والاطلاع على العمل في مختبرات التَّشريح في ذلك الوقت، رأى دين أن الرئات والمثانات الهوائية تبدو بشكلٍ أساسي ذات الشيء في أثناء النُّمو. يتبرعم كل من العضوين من أنبوب القناة الهضمية ويشكل كلاهما أكياسًا هوائية. والفرق الرئيس هو أنَّ مثانة السباحة تتطور في الجزء العلوي من الأنبوب قُرب العمود الفقري، بينما تتبرعم الرئتان من الأسفل، أو من جهة البطن. وباستخدام هذه

(12) حول العلاقات التنموية والتطورية بين مثانة السباحة والرئتين، انظر باشفورد دين:

Bashford Dean, Fishes, Living and Fossil (New York: Macmillan, 1895).

كتالوجه لمجموعة الدروع في متحف متروبوليتان للفنون متاح رقميًا على الرابط الآتي:

http://libmma.contentdm.oclc.org/cdm/ref/collection/p15324coll10/id/17498.

للحصول على مُلخَّص لعمله وحياته، راجع الرابط الآتي:

https://hyperallergic.com/102513/the-eccentric-fish-enthusiast-who-brought-armor-to-the-met/.

الأفكار، زعم دين أن مثانة السباحة والرئتين كانتا نسختين مختلفتين لنفس العضو، وتشكلتا من خلال نفس عملية النُّمو. في الواقع، يُوجد نوعٌ ما أو آخر من الأكياس الهوائية في جميع الأسماك تقريبًا باستثناء أسماك القرش. ومثل الكثير من الأفكار في العلم، كان لمقارنة دين تلك تاريخ طويل. ويمكن رؤية بداياتها في أعمال علماء التَّشريح الألمان في القرن التاسع عشر.



كان باشفورد دين، أمين متحف متروبوليتان للفنون والمتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي، يحب الدروع القتالية والأسماك.

ولكن ماذا تقول الأكياس الهوائية عن نقد ميفارت وردّ داروين؟

هناك عدد مُدهش من الأسماك التي يمكنها أن تتنفس الهواء فترات طويلة. يستطيع نطّاط الطين الذي يبلغ طوله ست بوصات أن يمشي ويعيش على الوحل لأكثر من أربع وعشرين ساعة. ويستطيع سمك الفَرخ المتسلِّق climbing perch ذو الاسم المعبّر

أن يتلوّى للانتقال من بركة إلى أخرى حسب الحاجة، وفي بعض الأحيان يتسلق الفروع ويتخطى الأغصان في هذه العملية. لكن سمك الفرخ هذا ليس سوى نوع واحد. يمكن لمئات الأنواع من الأسماك أن تعُبّ الهواء عندما ينخفض تركيز الأوكسجين في الماء الذي تعيش فيه. كيف تفعل تلك الأسماك ذلك؟[13]

بعضها، مثل نطّاط الطين، يمتص الأوكسجين من خلال جلده. ولدى البعض الآخر عضو خاص لتبادل الغازات فوق خياشيمها. تمتص بعض أسماك السّلُّور والأنواع الأخرى الأوكسجين من خلال أحشائها، وتبتلع الهواء مثل الطعام، لكن لاستخدامه في التنفس. ويملك عددٌ من الأسماك رئتان تشبهان رئتينا، كما تعيش الأسماك الرئوية في الماء وتتنفس بخياشيمها معظم الوقت، ولكن عندما لا يكون محتوى الأوكسجين في الماء كافيًا لدعم عملية الأيض، فإنها تندفع إلى السطح وتبتلع الهواء إلى رئتيها.

إنّ تنفس الهواء ليس استثناءً مجنونًا في بعض الأسماك الغريبة، بل هو الوضع الشائع.

أعاد الباحثون في جامعة كورنيل مؤخرًا النظر في مقارنة مثانات السباحة بالرئات باستخدام تقنيات وراثية جديدة. وكان سؤالهم:

---

(13) من التحليلات التي تتناول تنفس الهواء، كيه إف ليم "شكل ووظيفة الرئتين: تطور آليات تنفس الهواء"، وجيفري ب. جراهام: "الأسماك التي تتنفس الهواء".

K. F. Liem, "Form and Function of Lungs: The Evolution of Air Breathing Mechanisms," American Zoologist 28 (1988): 739–59; and Jeffrey B. Graham, Air-Breathing Fishes (San Diego: Academic Press, 1997).

ويوضح كلاهما كيف أنّ الرئات هي الحالة البدائية للأسماك العظمية، ويؤكدان المقارنة بين مثانة السباحة والرئتين.

ما الجينات التي تسهم في تكون مثانة السباحة في الأسماك في أثناء النُّمو؟ ومن خلال النظر في قائمة الجينات النشطة في أجنّة الأسماك وجدوا شيئًا كان سيُسعد دِين وداروين، فالجينات المُستخدمة لتكوين مثانة السباحة في الأسماك هي نفس الجينات المستخدمة لتكوين الرئات في كل من الأسماك والبشر. كانت الأكياس الهوائية شائعة لدى جميع الأسماك تقريبًا، فيستخدمها البعض منها كرئات، بينما يستخدمها البعض الآخر كأجهزة طفو.(14)

وهنا يظهر كيف أن ردَّ داروين على ميفارت كان بعيد النظر.

يُظهر الحمض النووي بوضوح أنَّ الأسماك الرئوية وأسماك البشير التي درسها سانت هيلير وغيرها من الأسماك ذات الرئات هي أقرب الأسماك الحية إلى الكائنات التي تعيش على اليابسة. الرئات ليست ابتكارًا ظهر فجأة عندما تطورت الكائنات لتتمكن من المشي.

كانت الأسماك تتنفس الهواء بالرئات قبل أن تطأ الحيوانات اليابسة أصلًا، فإنَّ غزو أحفاد الأسماك لليابسة لم يُنشِئ عضوًا جديدًا، بل غيَّر وظيفة عضو كان موجودًا بالفعل. وفوق ذلك، تملك جميع الأسماك تقريبًا نوعًا من الأكياس الهوائية، سواء أكانت رئة أم مثانة سباحة. تحولت الأكياس الهوائية من استخدامها للحياة في الماء إلى تمكين الكائنات فيما بعد من العيش والتنفس على الأرض.

---

(14) وقد وجدت المقارنات الجينية الأخيرة بين الرئات ومثانات السباحة أوجه تشابه عميقة، انظر:

A. N. Cass et al., "Expression of a Lung Developmental Cassette in the Adult and Developing Zebrafish Swimbladder," Evolution and Development 15 (2013): 119–32.

كان دين ومعاصروه سيفخرون بذلك.

فلم يتضمن التغيير ظهور عضو جديد، بل كان التحوّل، كما قال داروين بشكل أعمّ، «مصحوبًا بتغيير في الوظيفة».[15]

رفرفة:

لم يكن هدف مَأخذ ميفارت ضد داروين هو الأسماك أو البرمائيات، بل الطيور. في ذلك الوقت، كان أصل الطيران لغزًا هائلًا. في الطبعة الأولى من كتاب أصل الأنواع عام 1859، قدم داروين تنبؤات محددة للغاية. إذا كانت نظريته عن الأصل المشترك للحياة على الأرض صحيحة، فيجب أن تكون هناك مراحل وسيطة في السجل الأحفوري، تلك التي تمثل التحولات بين أشكال الحياة المختلفة. وفي ذلك الوقت، لم يكن هناك أي منها معروفًا، ناهيك عن أي رابط بين الطيور المحلّقة والمخلوقات التي تعيش على الأرض.

لكن داروين لم يضطر إلى الانتظار طويلًا. في عام 1861، اكتشف العمال في مقلع للحجر الجيري في ألمانيا حفريّة استثنائية. كان الحجر الجيري ذو الحبيبات الدقيقة المستخرج من المقلع حجرًا مثاليًا للألواح المستخدمة في الطباعة الحجرية، وهي عملية الطباعة الشائعة في ذلك الوقت. تشكَّل الحجر الجيري في بيئة بحيرة هادئة جدًّا، ما يعني أن كل ما علق بداخله لم يتأثر نسبيًا. ولعل تلك الصخور شبه مثالية للحفاظ على الحفريّات.

كان على تلك الصفيحة أثَرٌ غريبٌ، إذ ضمت شيئًا طويلًا وريشي الشَّكل. بدت كأنها ريشة مثالية الشَّكل، أمّا لماذا قد توجد ريشة في

(15) قصة الرئتين ليست سوى مثال واحد على أهمية تغيير الوظيفة عند نشأة الأسماك التي تعيش على اليابسة.

تلك الصخور، فكان لغزًا.

يعود تاريخ الحجر الجيري الذي يحمل الأثر الغريب إلى العصر الجوراسيّ، وقبل عقود من ذلك الاكتشاف، لاحظ الأرستقراطيّ وعالم الطبيعة الألماني ألكسندر فون هومبولت (1769-1859) وجود حجر جيريّ مميز في جبال جورا المتاخمة لفرنسا وسويسرا.

شكّل ذلك الحجر الجيري طبقة امتدت لأميال. سمّاه فون هومبولت «جوراسيّ»؛ لخصائصه المميزة التي تشير إلى أنه قد يعود إلى عصر محدد في تاريخ الأرض. وبعد فترة وجيزة لاحظ علماء آخرون أنَّ الطبقة الجوراسيّة كثيرًا ما تكون مليئة بالحفريّات، مثل: الكائنات الكبيرة الملتفة ذات القشور المعروفة بالأمونيت. وعُثر على حفريّات مماثلة في أنحاء العالم، ما دفع الباحثين إلى إدراك أن العصر الجوراسيّ كان عصرًا محددًا امتدت آثاره على مستوى العالم، وليس خاصًا بفرنسا وسويسرا.

ثم، وفي أوائل القرن التاسع عشر، عُثر على أسنان وفكوك كبيرة في الصخور الجوراسيّة في إنجلترا. وبدأت اكتشافات مماثلة تبرز في كل مكان. وسرعان ما أصبح واضحًا أن العصر الجوراسيّ لم يكن عصر المخلوقات الملتفة ذات القشور فحسب، بل عصر الديناصورات. كشف أثر الريشة أكثر من ذلك. هل كانت الطيور تحلق فوق الديناصورات على اليابسة في العصر الجوراسيّ؟[16]

---

(16) للاطلاع على نظرات عامة على تطور الديناصورات وعلاقاتها مع الطيور، والتفسيرات الشائعة بين علماء الديناصورات، انظر: "الانقراض المغلوط" و"صعود الديناصورات واندثارها: تاريخ جديد لعالم ضائع" و"كشف التنين".

كان وجود حفريّة لريشة معزولة شيئًا محيرًا، ربما كانت مرتبطة بطائر جوراسيّ، أو ربما بعض الأنواع غير المعروفة من المخلوقات كان لها ريش أيضًا، لا يمكن استبعاد تلك الفرضية.

وبعد سنوات قليلة من اكتشاف الريشة في عام 1861، قايض أحد المزارعين حفريّة لقاء خدمة طبية. جاءت هذه الحفريّة من نفس الحجر الجيري الذي جاءت منه الريشة المعزولة. وكان الطبيب الذي اشتراها عالم تشريح متمرسًا، وكان شغوفًا بالحفريّات. وعليه، عرف للوهلة الأولى أن تلك لم تكن صفيحة عادية من الحجر الجيري. إذ كانت على الحفريّة بداخلها آثار ريش غطت الجسم والذيل، وكانت متصلة بهيكلٍ عظمي كامل تقريبًا ذي عظام وأجنحة مجوّفة. ولأنه يعرف قيمة العينة، بدأ الطبيب حرب مزايدات بين المتاحف التي تريد الحصول عليها، وفي النهاية حصل على 750 جنيهًا إسترلينيًّا من المتحف البريطاني.

ظهر على مدى السنوات الخمس عشرة التالية المزيد من العينات. في منتصف سبعينيات القرن التاسع عشر، باع مزارع يُدعى جاكوب نيماير حفريّة لمالك مقلع بسعر بقرة. وكان صاحب المحجر يعرف شهرة الطبيب الذي عرض العينة السابقة في لندن، فباع الحفريّة لنفس الطبيب في عام 1881. بيع الهيكل بألف جنيه لمتحف التاريخ الطبيعي في برلين. وحتى يومنا هذا، اكتُشف ما مجموعه سبع

Lowell Dingus and Timothy Rowe, The Mistaken Extinction (New York: W. H. Freeman, 1998); Steve Brusatte, The Rise and Fall of the Dinosaurs: A New History of a Lost World (New York: HarperCollins, 2018); and Mark Norell and Mick Ellison, Unearthing the Dragon (New York: Pi Press, 2005).

عينات.

كان لذلك المخلوق المغطى بالريش الذي أطلق عليه اسم: «الأركيوبتركس Archaeopteryx»، مزيج غريب من السمات. فمثل الطيور، كانت له أجنحة مليئة بالريش وعظام مجوّفة. ولكن على عكس أي طائر معروف، كانت لديه أسنان، مثل: آكلات اللحوم، وعظم صدر مسطح، وثلاثة مخالب حادة على عظام أطراف جناحيه.

لم يكن من الممكن أن يأتي هذا الاكتشاف في وقتٍ أفضل بالنسبة لنظرية داروين. عندما فحص توماس هنري هكسلي أسنان وأطراف ومخالب الأركيوبتركس، رأى تشابهًا عميقًا بين الأركيوبتركس والزواحف. وقارن الأركيوبتركس بمخلوق آخر من الحجر الجيري الجوراسيّ، وهو ديناصور صغير يعرف باسم أنيق الفك أو كومبسوجناثوس compsognathus. كان المخلوقان من نفس الحجم، وكان لهما هيكل عظمي متماثل باستثناء الريش. أعلن هكسلي أن الأركيوبتركس يمثل دليلًا على نظرية داروين، إذ كان وسيطًا بين الزواحف والطيور. حتى أن داروين أشار إلى الأركيوبتركس في الطبعة الرابعة من كتابه عن أصل الأنواع: «تقريبًا لا يوجد أي اكتشاف حديث يُظهر بشكل أكثر قوة من هذا الاكتشاف مدى ضآلة ما نعرفه حتى الآن عن سكان العالم السابقين».

أشعلت مقارنات مثل تلك التي أجراها هكسلي جدلًا واسعًا. إذا كان الأركيوبتركس دليلًا على أن الطيور كانت مرتبطة

بالزواحف، فما الزواحف التي كانت أسلافها؟ كان هناك العديد من المرشحين الواضحين، ولكلٍّ منها من يدافع عنه. اقترح البعض أن ذيل الأركيوبتركس الطويل وشكل جمجمته يكشفان أن أسلاف الطيور كانت مخلوقات صغيرة آكلة لحوم تشبه السحالي. وقارن آخرون الطيور بمجموعة أخرى من الزواحف الطائرة من العصر الجوراسيّ، وهي التيروصورات pterosaurs.

تكمن صعوبة هذه النظرية في أنه في حين أن التيروصورات كانت لها أجنحة وأنها تطير، فإن العظام التي تشكل أجنحتها تختلف تمامًا عن عظام الطيور، فأجنحة التيروصورات مدعومة بإصبع رابع ممدود، بينما أجنحة الطيور مدعومة بالريش ومجموعة من الأصابع. ومع ذلك أُعجب آخرون بمقارنة هكسلي بين الأركيوبتركس والديناصور الصغير.[17]

اكتسبت فكرة أنَّ سلف الطيور كان نوعًا ما من الديناصورات منتقدين بارزين على مر السنين، اعتمد كل منهم على حجج مختلفة. ادَّعى أحد الباحثين أنه وجد عيبًا قاتلًا في النسب بين الطيور والديناصورات، فالطيور تملك ترقوة، في حين أن الديناصورات، على عكس جميع الزواحف الأخرى، لا تملك ترقوة. ورأى باحثون آخرون أن الديناصورات والطيور مختلفة تمامًا في نمط الحياة والأيض الغذائي، إلى درجة أنه لا يمكن أبدًا عد الديناصورات

(17) للاطلاع على وصف شعبي جميل لأعمال هكسلي حول الأركيوبتركس وأصل الطيور، انظر: "توماس هنري هوكسلي والديناصورات الطائرة".
Riley Black, "Thomas Henry Huxley and the Dinobirds," Smithsonian (December 2010).

أسلافًا للطيور. كانت الديناصورات، مع استثناءات قليلة، وحوشًا كبيرة بطيئة الحركة، ولا تشبه كثيرًا الطيور الصغيرة النشطة للغاية. كان الأركيوبتركس، بالنسبة للكثيرين، مجرد طائر لا يقول الكثير عن عملية التحول. استمر الصراع، ويرجع ذلك إلى حدٍّ كبير إلى بقاء انتقاد ميفارت الأساسي قائمًا: كيف ظهر الريش وكل السمات المتخصصة الأخرى للطيور، بما فيها سمات الأركيوبتركس؟

إن فكرة أن الديناصورات كانت وحوشًا ضخمة ثقيلة الحركة لها تاريخ طويل. وكذلك كانت الحال بالنسبة لسقوط هذا الرأي، الذي بدأه عمل عالم آخر صاحب منهج انتقائي كان، مثل: باشفورد دين، يحب ارتداء الأزياء العسكرية.

كان فرانز نوبسا فون فيلسو- زيلفاس (1877-1933) المعروف باسم: «البارون نوبسا الساسيلي»[18]، رجلًا ذا ولع شديد وذكاء عظيم. في الثامنة عشرة من عمره، اكتشف بعض العظام في ملكية عائلته في ترانسيلفانيا. وبعد أن علم نفسه التَّشريح، نشر في عام 1897 وصفًا علميًّا رسميًّا لها على أنها تعود إلى ديناصور كبير. كتب نوبسا مجلدًا من سبعمائة صفحة عن جيولوجيا ألبانيا، فضلًا عن عشرات الأوراق العلمية بلغات متعددة. وعمل جاسوسًا للنمسا، كما عمل على تنظيم مقاومة الألبان للأتراك للحصول على حريتهم.

كان حلم البارون الحقيقي هو تولي عرش ألبانيا، لكن للأسف، انتهت حياته عندما أطلق النار على عشيقته، بعد أن تراكمت عليه

(18) ساسيل Săcel، هي بلدية في رومانيا الآن. (المترجم).

ديون كبيرة، ثم على نفسه.[19]

بعد أن وجد العظام في أرض عائلته في عام 1895، جمع نوبسا مجموعة كبيرة من الحفريّات، وشرع في دراسة ديناصورات ترانسلفانيا، سواء أكان عظامها أم المسارات التي تركتها في الحجارة المحفوظة في أنحاء أوروبا الشرقية. وعند النظر إلى المسارات المحفوظة في الصخور، رأى آثارًا لمخلوقات حية تتنفس وتسير في الطين.

أظهرت العلامات الموجودة في الطين أن الحيوانات التي تركتها كانت قادرة على الركض بسرعة، وكانت تلك الحيوانات تضغط بقوة على الأرض، كما كشفت المسافة بين آثار الأقدام أنها كانت تجري. كان المعنى الضمني واضحًا، فالديناصورات كانت بعيدة عن أن تكون وحوشًا بطيئة الحركة مثل الفيلة، بل كانت مفترسات سريعة الحركة ونشطة. وقد أخذ نوبسا هذه الفكرة إلى أبعد من ذلك؛ نظرًا لأن الديناصورات الراكضة يجب أن تكون سريعة وخفيفة، فإنها ستشكل أسلافًا ممتازة للطيور. ومن وجهة نظره،

---

(19) عن البارون نوبسا، وحياته الحافلة، وعلمه الرائدة، انظر: "صيادو الديناصورات العظام واكتشافاتهم"، و"التاريخ ينسى هذا الأرستقراطي المارق الذي اكتشف الديناصورات ومات مفلسًا"، و"أعمال فرانز بارون نوبسا: الديناصورات، والتطور، والنظريات التكتونية".

E. H. Colbert, The Great Dinosaur Hunters and Their Discoveries (New York: Dover, 1984); Vanessa Veselka, "History Forgot This Rogue Aristocrat Who Discovered Dinosaurs and Died Penniless," Smithsonian (July 2016); and David Weishampel and Wolf-Ernst Reif, "The Work of Franz Baron Nopcsa (1877–1933): Dinosaurs, Evolution, and Theoretical Tectonics," Jahrbuch der Geologischen Anstalt 127 (1984): 187–203.

كانت الحاجة إلى السرعة ستدفعها إلى الهواء، وكانت الأجنحة المكسوة بالريش ستساعد الطيور الأولية على رفرفة أذرعها لزيادة السرعة والقبض على الفرائس.



البارون نوبسا بالزي الألباني. وهو الذي درس مثل دين، التاريخ العميق للابتكارات التطورية. واستمتع أيضًا بارتداء الدروع والشارات العسكرية.

عندما نشر نوبسا فكرته في عام 1923، قاسى من مصيرٍ هو الكابوس الذي يخشاه معظم العلماء، فقد تعرض للتجاهل. كانت النظرية السائدة لفترة طويلة التي نشرها بقوة عالم الحفريّات البارز أو سي مارش من جامعة ييل، كانت ترى أن الديناصورات كبيرة الحجم وبطيئة الحركة، وأن الطيور نشأت من أسلاف كانت

تُحوِّم.[20] من المفترض أنَّ أصول التحليق[21] تعود إلى الحيوانات التي تعيش في الأشجار، والتي تستخدم التحويم للانتقال من فرعٍ إلى فرع. وبمرور الوقت، تطور الطيران من هؤلاء الأسلاف المحوّمين. يمكن رؤية سبب الجاذبية البدهية التي تمثلها هذه النظرية في الحيوانات المُحوّمة المتنوعة الموجودة اليوم، من الضفادع والثعابين إلى السناجب والليمور؛ ونظرًا لأن هناك حاجة إلى عددٍ أقل نسبيًّا من الابتكارات المعقدة حتى يصبح الحيوان محومًا وليس طائرًا، فقد بدا التحويم بمثابة خطوة أولى منطقية في نشأة التحليق.

في ستينيات القرن الماضي كان جون أوستروم الذي كان حينها عالمًا مبتدئًا في جامعة ييل، يحاول فهم كيف عاشت الديناصورات ذات منقار البط. تلك القاطنات المألوفة في قاعات الديناصورات في جميع المتاحف الكبرى تقريبًا، كثيرًا ما يكون لديها عُرف ضخم في جماجمها يبرز بعيدًا عن مناقيرها التي تحمل اسمها. لسنوات، صورتها معارض المتاحف على أنها أكلات نبات بطيئة تتحرك على أربعة أرجل، وكأنها فيلة زاحفة. لكن كلما نظر أوستروم إلى العظام، قلت معقولية هذا التفسير.

أولًا: كانت الأطراف الأمامية قصيرة نسبيًّا، ومن شأن الأطراف الأمامية الضعيفة والأطراف الخلفية القوية أن تجعلها منحنية بشكلٍ غريب بالنسبة لحيوان يمشي على أربعة أرجل. فوق ذلك، تشير البروزات والنتوءات الموجودة على الأطراف الخلفية إلى أن لديها

---

(20) حام الطَّائرُ، أي: حلَّق في الهواء، بسط جناحيه دون تحريكهما من مرتفعٍ إلى منخفض، قاموس اللغة العربية المعاصر. (المترجم).

(21) حلَّق الطائرُ: ارتفع في طيرانه واستدار، المعجم الوسيط. (المترجم).

عضلات قوية تحركها. مجتمعة، تشير هذه الملاحظات إلى أن ديناصورات منقار البط كانت في الغالب تسير على قدمين. ذهب أوستروم إلى أبعد من ذلك، فهو لم يرَ ديناصورات منقار البط حيوانات ثقيلة الحركة مثل الفيلة، بل عدّاءة نشطة نسبيًّا تستخدم قدميها الخلفيتين، ودعاها الجواميس ذات القدمين.

اكتسبت المبارزة بين ميفارت وداروين في القرن التاسع عشر معنىً جديدًا عندما انتقل أوستروم إلى الأراضي الوعرة في وايومنج في الستينيات. ومثل معظم علماء الحفريّات، عاش أوستروم حياتين: حياة الباحث التقليدي والمدرّس خلال العام الدراسي، والحياة المغبرّة الخشنة والمتقلبة في الرحلات الاستكشافية في الصيف.

وفي آب (أغسطس) عام 1964، كان يستعد للانتهاء من رحلة استكشافية غير حافلة قُرب بلدة بريدجر، مونتانا، عن طريق البحث عن مواقع مناسبة للتنقيب كي يعمل عليها في العام التالي. وفي أثناء سيره على جانب منحدر، توقف هو ومساعده عند ملاحظة شيءٍ ناتئ من الصخور. تبيّن أنها يد يبلغ طولها حوالي ست بوصات. قال أوستروم بعد ذلك واصفًا التجربة: «لقد كاد كلانا أن يتدحرج على المنحدر في أثناء اندفاعنا إلى المكان». وسبب الاندفاع يكمن فيما امتد من اليد: مخالب حادة ضخمة لم يريا مثلها من قبل.

وبما أن تلك كانت جولة استطلاعية في اليوم الأخير، فلم تكن معهما أدوات.

يجدر بطلاب علم الحفريّات الذين سيقرأون هذه الفقرة أن يتجاهلوا ما فعلوه بعد ذلك، فبسبب حماسهما خالفا أولى التعليمات

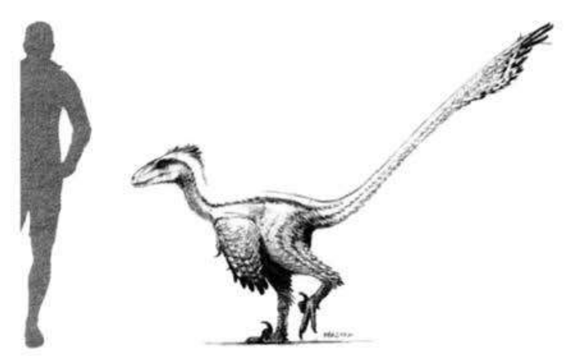
الأساسية للعمل الميداني في علم الحفريّات، وحفرا بسرعةٍ بأيديهما ومطاويهما للكشف عن أجزاء أكبر من الوحش، ثم عادا في اليوم التالي بالأدوات المناسبة، فكشفا عن قدم وبعض الأسنان. كانت الأسنان أسنان حيوان مفترس، ذات رؤوس حادة وحواف مسننة. أدى الحفر لعامين آخرين إلى استعادة جزءٍ كبير من الهيكل العظمي.

كان ديناصور أوستروم بحجم كلب كبير، لكن عظامه كانت خفيفة وجوفاء بشكلٍ غريب. كان للمخلوق ذيل عضلي وأطرافه الخلفية قوية للغاية وبها مخالب. وكانت المخالب مركبة على مفاصل، ما يعني أنه يمكن استخدامها لسلخ الفريسة. أطلق أوستروم على الوحش اسم دينونيكوس Deinonychus (تعني في اليونانية: «المخلب الرهيب»). وفي دراسته المنشورة لاحقًا، وفي وصف مدفون وسط النثر الجاف المعتاد، كتب عن الدينونيكوس أنه «شديد الضراوة، ورشيق للغاية، ونشط للغاية».

كان الدينونيكوس مجرد البداية. لقد غيّر أوستروم ومن تبعوه طريقة تفكيرنا في الديناصورات، وفي هذا التغيير، كشفوا عن قوة رد داروين على ميفارت. لقد بحثوا كل نتوء وثقب وسِمة في عظام الزواحف وقارنوها بعظام حفريّات الطيور والحية منها. وسرعان ما استنتجوا أن الديناصورات، خاصة تلك التي تسير على قدمين، والطيور تشترك في العديد من الخصائص. لتلك الأنواع، أي: ديناصورات الثيروبود (التي تسير على قدمين)، مجموعة من سمات الطيور، بما في ذلك العظام المجوفة ومعدلات النُّمو السريعة نسبيًّا. لقد كانت على الأرجح حيوانات نشطة للغاية وذات معدل أيض

مرتفع.

وعلى الرغم من أنَّ تلك الديناصورات كانت لها أوجه تشابه عدة مع الطيور، فإنها كانت تفتقد ميزة واحدة مهمة، وهي: الريش. كان يُنظر إلى الريش على أنه شرط لا غنى عنه حتى يكون الحيوان من الطيور، كما يرتبط بنجاح الطيور وأصل الطيران.



الدينونيكوس، الديناصور ذو «المخلب الرهيب».

في عام 1997 عقدت جمعية علم الحفريّات الفقارية اجتماعها في المتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي في نيويورك.

كنا معظمنا من الحاضرين، نعلم أن شيئًا غريبًا كان يحدث.

عادة ما يكون هذا التجمع الدولي رصينًا للغاية، حيث تتخلل المحادثات والمحاضرات حفلات الكوكتيل واللقاءات الاجتماعية. وفي ذلك الوقت، كان أعضاء الجمعية يميلون إلى التفرق إلى زمر، تحددها في الغالب المخلوقات التي يعملون عليها. يحضر الباحثون في مجال الثدييات محاضرات الثدييات، ويذهب علماء الحفريّات

السَّمكية إلى المحادثات حول الأسماك، وهكذا. كنا نتواصل اجتماعيًّا، ثم نذهب كلٌّ في طريقه لحضور الجلسات العلمية.

لكن عام 1997 كان مختلفًا. كان هناك طنين في الأجواء في كل قاعة وبين كل زمرة: «هل رأيته؟»، «هل هو حقيقي؟»

جاء زملاء صينيون ومعهم صور لحيوان جديد اكتشفه المزارعون في مقاطعة لياونينج، شمال شرق بكين. كان ذا عظام مجوفة، ومخالب في الأيدي والأقدام، وذيلٍ طويل، كانت لديه كل خصائص ديناصور شبيه بالدينونيكوس. لكن تلك الحفريّة كانت محفوظة بشكلٍ رائع. كانت مطمورة في الحبيبات الدقيقة التي تميز الصخور، والتي تحفظ آثار أو أجزاء الأنسجة الرخوة المتحجرة. وذلك ما كانت تدور حوله الضجة: كان يحيط بالديناصور ريش لا تخطئه العين. ليس ريشًا كاملًا، ولكنه ريش زَغَبيّ بسيط جدًّا. كان لهذا الديناصور غطاء بدائي من الريش.

كان أوستروم بين الحاضرين، وكنت عالمًا مبتدئًا حينها، وأتذكر أنني رأيته في استراحة لتناول القهوة بين الجلسات، يتحدث إلى أحد علماء الحفريّات الكبار. وقد كان يبكي. عمله الذي استمر ثلاثين عامًا، وكان موضع جدال افتقدته حفريّة واحدة. نُقل عنه حينها قوله: «حرفيًّا شعرت أن ساقَيَّ لا تحملانني عندما رأيت الصور لأول مرة.

لم يكن الغطاء الظاهري لهذا الديناصور يشبه أي شيء رأيناه في أي مكان في العالم من قبل»، وقد قال لاحقًا: «لم أتوقع قط أن أرى

شيئًا كهذا في أثناء حياتي».[22]

كانت الديناصورات ذات الريش التي رأيناها في نيويورك عام 1997 هي الأولى ضمن موجة كبيرة من الحفريّات الجديدة المكتشفة في تلك المواقع الصينية. وفي العقود التالية، ظهر ما يقارب من اثني عشر نوعًا من الديناصورات ذات الريش من الصين، مما رسم صورة للديناصورات آكلة اللحوم ذات أغطية متفاوتة. الأكثر بدائية بين المجموعة لها ريش ذو شكلٍ أنبوبي بسيط. أمّا الديناصورات الأقرب للأركيوبتركس والطيور، فتملك ريشًا حقيقيًّا ذا ساقٍ مركزية وألياف تمتد إلى الخارج. فالريش ليس سمة متخصصة للغاية تخص الطيور، فقد عثر عليه في جميع الديناصورات آكلة اللحوم تقريبًا.

تتميز الطيور بما هو أكثر من الريش، فهي تملك: ترقوةً، وأجنحةً، وعظام رسغ متخصصة تستخدم للطيران. يحتوي جناح الطائر

---

(22) نُشرت أعمال جون أوستروم في عددٍ من الأوراق البحثية في ستينيات وسبعينيات القرن العشرين، بما في ذلك وصفه الرسمي للداينونيكوس:

J. Ostrom, "Osteology of Deinonychus antirrhopus, an Unusual Theropod from the Lower Cretaceous of Montana," Bulletin of thePeabody Museum of Natural History 30 (1969): 1–165.

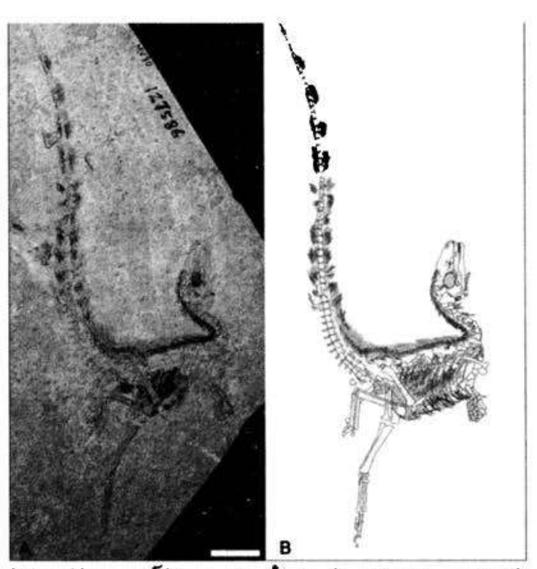
وشملت الأوراق التي تلت ذلك: "الأركيوبتركس ونشأة الطيور" و"أسلاف الطيور":

J. Ostrom, "Archaeopteryx and the Origin of Birds," Biological Journal of the Linnaean Society 8 (1976): 91–182; and J. Ostrom, "The Ancestry of Birds," Nature 242 (1973): 136–39.

للاطلاع على وصف لمساهمات أوستروم، انظر ريتشارد كونيف، "الرجل الذي أنقذ الديناصورات":

Richard Conniff, "The Man Who Saved the Dinosaurs," Yale Alumni Magazine (July 2014).

النمط الكلاسيكي الذي يتألف من: عظمة واحدة، ثم عظمتين، ثم الرسغ، ثم الأصابع. وتضم أطراف الطيور ثلاثة أصابع فقط، وليس خمسة، والوسطى ممدودة، وتعمل كنقطة ربط للريش. وللطيور عدد أقل من عظام الرسغ، بما فيها تلك التي لها شكل هلال كبير، ذات الاسم المناسب العظم شبه الهلالي.



برّأت الديناصورات ذات الريش أوستروم والآخرين الذين قالوا: إن الديناصورات هي أقرب أقرباء الطيور.

كلما نظرنا أكثر، رأينا أنَّ الابتكارات التَّشريحية التي تستخدمها الطيور للطيران، ليست فريدة فيها وحدها، فقد أصبحت الديناصورات آكلة اللحوم أكثر شبهًا بالطيور بمرور الوقت.

كانت للأنواع البدائية أطراف بها خمسة أصابع. وعلى مدى عشرات الملايين من السنين تفقد الأنواع الأصابع حتى يتبقى لها

نمط الطيور المُؤلَّف من ثلاثة أصابع، بما في ذلك الإصبع الأوسط الممتد الذي يعمل في الطيور كقاعدة للجناح. ومثل الطيور، تفقد هذه الديناصورات عظام الرسغ وتطور عظمًا شبه هلالي، يشبه ذلك الذي تستخدمه الطيور في رفرفة الطيران. حتى أنها تطور عظام الترقوة. لا يستطيع أي ديناصور من هذه الديناصورات الطيران، لكنها جميعها تملك نوعًا من الريش، بدءًا من غطاء من الزغب البسيط في الأشكال البدائية إلى تلك ذات التنظيم الأكبر، مثل: الأركيوبتركس والديناصورات اللاحقة. فماذا كانت فائدة الريش للديناصورات؟ اقترح بعض علماء الحفريّات أنها كانت بمثابة نوع من الاستعراض لمساعدتها في العثور على أقران. واقترح آخرون أن الريش الناعم البدائي كان بمثابة شكلٍ من أشكال العزل، مما يحافظ على درجات الحرارة الداخلية للجسم دافئة. وربما أدى الريش كل من الدورين. ومهما كانت وظيفته في الديناصورات، فإن أصل الريش ليست له علاقة بالطيران بالتأكيد.[23]

مثل الرئتين والأطراف في عملية الانتقال من الماء إلى الأرض، سبقت الابتكارات المستخدمة في الطيران نشأة الطيران. فالعظام

---

(23) امتدت الدِّراسات الاستقصائية الحديثة لنشأة السمات features [كذا في الأصل والمقصود نشأة الريش Feathers (المترجم)] إلى مجالات علم الحفريات وعلم الأحياء التطوري. انظر: "أيهما جاء أولًا، الريشة أم الطائر"، و"تطور الابتكارات المورفولوجية للريش":

See R. Prum and A. Brush, "Which Came First, the Feather or the Bird?," Scientific American 288 (2014): 84–93; and R. O. Prum, "Evolution of the Morphological Innovations of Feathers," Journal of Experimental Zoology 304B (2005): 570–79

المجوفة، ومعدلات النُّمو السريعة، والأيض العالي، والأذرع المجنحة، والأرساغ ذات المفصلات، وبالطبع الريش، نشأت في الأصل في الديناصورات التي كانت تعيش على الأرض، وتجري بسرعة لتمسك بفرائسها. لم يكن التغيير الرئيس يتمثل في تطوير أعضاء جديدة بالذات، بل في إعادة استخدام السمات القديمة لأغراض ووظائف جديدة.

كان من المعروف بشكلٍ عام أن الريش قد نشأ لمساعدة الطيور في الطيران والرئات لتمكين الحيوانات من العيش على الأرض. هذه المفاهيم منطقية، هذا واضح - لكنها مغلوطة. الأكثر من ذلك، أننا كنا نعرف هذا منذ أكثر من قرن.

السر غير الخافي على أحد هو أن **الابتكارات البيولوجية لا تحدث أبدًا في أثناء التحولات الكبيرة التي ترتبط بها.** لم ينشأ الريش في أثناء تطور الطيران، ولم تنشأ الرئات والأطراف في أثناء الانتقال إلى اليابسة. علاوة على ذلك، فإن هذه الثورات العظيمة في تاريخ الحياة، وأمثالها، لم يكن من الممكن أن تحدث بطريقةٍ أخرى، ولم يكن من الضروري أن تنتظر التغييرات الكبرى في تاريخ الحياة حتى تنشأ العديد من الابتكارات بشكلٍ متزامن. حدثت التغييرات العظيمة من خلال إعادة استخدام التراكيب القديمة لأغراض جديدة. للابتكارات سوابق تمتد عميقًا في الزمن. فلا شيء يبدأ أبدًا في الوقت الذي تعتقد أنه بدأ فيه.

تلك هي قصة الثورة عن طريق التطور. يسير التغيير في تاريخ الحياة على درب ملتوٍ مليء بالنهايات المسدودة، والابتكارات التي

فشلت فقط؛ لأنها ظهرت في الوقت الخطأ. كلمات داروين الثلاث التي زعم فيها أن الكثير من الابتكارات تحدث عن طريق التغيير في وظيفة السمات الموجودة مسبقًا مهدت الطريق لفهمنا لأصول الأعضاء، والبروتينات، وحتى الحمض النووي في أجسامنا.

لكن أجسام الأسماك والديناصورات والبشر لا تظهر كاملة عند الحمل، بل تُبنى من جديد في كل جيل وفق وصفة تنتقل من الآباء إلى الأبناء. يكمن أصل الابتكار داخل هذه الوصفات وفي كيف أنها، كما تنبأ داروين، قد تنشأ في أحد السياقات، ثم يُعاد توظيفها في سياقٍ آخر، كما سنرى.

لمزيد من القراءة:

كان جونار سيف سودربيرج، البالغ من العمر 22 عامًا، مسؤولًا عن فريق صغير من الجيولوجيين الذين يستكشفون الصخور في المنطقة بحثًا عن الحفريّات. كانت عملية البحث بسيطة نسبيًّا، ولا تستخدم تقنيات عالية. وفي كل يوم، كان الفريق يتفرق عبر الصخور، ويبحث عن العظام التي تبرز على السطح. وعندما يعثرون على بعض منها، يتتبعون القطع لمحاولة التعرف على الطبقة الصخرية التي أتت منها. كانت تلك بالضبط ذات التقنيات التي استخدمها فريقي بعد ما يقارب من ثمانين عامًا في القطب الشمالي الكندي للعثور على سمكة التيكتاليك روزي.

كان سيف سودربيرج يبحث عن أقدم المخلوقات التي سارت على اليابسة. وفي ذلك الوقت، لم يعثر أحد على أي أثر لحيوانات ذات أطراف في صخور العصر الديفوني التي يبلغ عمرها حوالي 365

مليون سنة. كان هدفه البحث في الصخور القديمة للعثور على كائنٍ برمائي يشبه السَّمك، نوع يردم الفجوة بين الأسماك والبرمائيات.

كان سيف سودربيرج ذا طاقة أسطورية، وكان يعمل حتى وقتٍ متأخر من الليل، ويقطع مسافات هائلة للعثور على الحفريّات. وكان أيضًا واثقًا جدًّا. المتشائمون لا يجدون الحفريّات، عليك أن تؤمن بوجود حفريّات في الصخور حتى تكرس الساعات الطويلة والجهود الضائعة الكثيرة للعثور عليها. كان مطلوبًا من فريقه أن يضع كل يوم ما يجده في أحد الصندوقين: P للأسماك (Pisces)، وA للبرمائيات Amphibians. لقد كانت خطوة جريئة، فلم يعثر أحد على الإطلاق على كائن برمائي في صخور ذلك العصر. وكما يمكنك أن تتخيل، على مدار الموسم الميداني لعام 1929، امتلأ صندوق الأسماك بالحفريّات وظل صندوق البرمائيات فارغًا.

قرب نهاية الموسم، عثر سيف سودربيرج على عددٍ من شظايا العظام غريبة الشَّكل في أنقاض سيلسيوس بيرج، وهي تلة ذات لون أحمر عميق مجاورة لجليد بحر شرق جرينلاند. جمع ما يقارب من اثنتي عشرة صفيحة من العظام، كل منها كانت مغروسة في الصخور مما حجب معظم بنيتها. وبدت هذه الصفائح، ببروزاتها وحوافها، مثل بعض الأسماك الأحفورية المعروفة في ذلك الوقت. بالحكم مما بقي منها، بدا أنها تنتمي إلى صندوق السَّمك. من الواضح أنها كانت من جمجمة، ولكنها كانت مسطحة جدًّا، بحيث لا يمكن ربطها بأي سمكة معروفة في ذلك الوقت.

اعتقد سيف سودربيرج أنها قد تكون لكائن برمائي، ولأنه كان

متفائلًا دائمًا، ألقى بها في الصندوق «A».

بعد عودته إلى السويد، بدأ سيف سودربيرج العملية الشاقة التي تحتاجها إزالة الحبيبات من الصخور التي تحيط بكل عظمة. كشفت إزالة الطبقات عن أعجوبة حقيقية. لقد وجد ما يشبه السَّمكة في شكل الجسم، لكن رأسها كان له خطم طويل وشكل مسطح مثل البرمائيات.

عثر سيف سودربيرج على البرمائي الأوليّ الذي كان يبحث عنه.

ذاع صيت الحفريّة، وكان من الممكن أن يذيع صيت سودربيرج أيضًا، لكنه تُوفي وفاة مأساوية؛ بسبب مرض السل قبل عيد ميلاده الثلاثين.

قصة عمل سيف سودربيرج رواها زميله وصديقه، إريك جارفيك. كان جارفيك أحد أعضاء البعثات المبكرة، وقد وضع تاريخًا موجزًا لبعثات جرينلاند ضمن دراسته الضخمة عن الإكثيوستيجا، وهي واحدة من أولى رباعيات الأرجل الديفونية المكتشفة:

E. Jarvik "The Devonian Tetrapod Ichthyostega," Fossils and Strata 40 (1996): 1–212. Carl Zimmer, At the Water's Edge: Fish with Fingers, Whales with Legs (New York: Atria, 1999)

وتُناقش سيف سودربيرج، وجارفيك، والتاريخ الأكبر لهذا المجال بأسلوب سهل القراءة.

بعد مرور خمسة عقود على مشروع سيف سودربيرج، عادت زميلتي جيني كلاك من جامعة كامبريدج إلى سيلسيوس بيرج والمواقع الأخرى التي درسها لتنظر بعيون جديدة. كان فريقها من

علماء الحفريّات على دراية جيدة باكتشافات وملاحظات سيف سودربيرج. وكان هدفهم هو العثور على الأجزاء المفقودة من الهيكل العظمي تلك التي لم يجمعها، فقد ضاعت في كل الضجة المحيطة بالحفريّات حقيقة أن أطرافها لم تكن معروفة جيدًا. عندما وصلت كلارك للصخور، شرعت في تصحيح ذلك. وبفضل الفريق المناسب، والطقس الجيد، ومعرفة أن الصخور واعدة، عادت ومعها مجموعة من الحفريّات. وكانت تلك الحفريّات تضم هياكل عظمية لأطراف محفوظة جيدًا ومتصلة بها.

كان للأطراف النمط الكلاسيكي المتمثل في: عظمة واحدة، ثم عظمتين، ثم مجموعة عظام صغيرة، ثم الأصابع المعروف في كل شيء له أطراف، سواء أكان حيوانًا ثديًّا أم طائرًا أم برمائيًّا أم زاحفًا (انظر ص 124). كانت المفاجأة في اليد والقدم، وكانت لتلك الحيوانات أكثر من خمسة أصابع في الأيدي والأقدام، وكان لديها ما يصل إلى ثمانية أصابع.

جعلت الأصابع الإضافية الأطراف عريضة ومسطحة. كل ما يتعلق بها بدءًا من أبعادها وحتى آثار العضلات على كل عظمة، يشير إلى أنها كانت تستخدم كمجاديف أو مقاذيف في الماء. كان الطرف بأكمله أشبه بالزعنفة منه باليد.

ما علاقة هذا بكلمات داروين الخمس؟ لم تكن الحيوانات الأقدم التي امتلكت أطرافًا بها أصابع تستخدمها للمشي على الأرض، بل للتجديف في الماء أو المناورة في المياه الضحلة في المستنقعات والجداول. وكما هي الحال مع الرئات، لم تكن هذه الابتكارات

العظيمة في الكائنات الحية البرية تستخدم في بداياته للعيش على الأرض، بل للاستفادة من البيئة المائية بطرق جديدة. ينشأ العضو أولًا في إحدى البيئات، ثم تحدث الثورة الكبيرة - عند التحول إلى بيئة جديدة - نتيجةً إعادة استخدامه لأداء وظيفة جديدة.

كان كتاب كلاك الجليل «**التقدم إلى اليابسة: أصل وتطور رباعيات الأرجل**» (بلومنجتون: مطبعة جامعة إنديانا، 2012) هو نتيجة العمل على أصل رباعيات الأرجل من شخص قضى عمره كاملًا ليجلب هذا المجال إلى العصر الحديث. يضم كتابها علم ذلك المجال وتاريخه، فضلًا عن وصفٍ شخصي مهم لعملها في المواقع الديفونية في جرينلاند.

نجدُ في الحيوانات الحية والحيوانات المنقرضة منذ أمد طويل، ظهورًا لـ: الرئات، والأذرع، والمرافق، والأرساغ لأول مرة في الحيوانات المائية.

لم تتضمن الثورة الكبرى في الانتقال من الحياة في الماء إلى الحياة على الأرض ابتكارات جديدة، بل تضمنت تغييرات في الابتكارات التي ظهرت قبل ملايين السنين.

إذا كان التاريخ مسارًا واحدًا من التغييرات، حيث تؤدي كل خطوة حتمًا إلى الخطوة التالية، وكل منها مصحوبة بتحسين تدريجي في وظيفة واحدة، فإن التغييرات الكبرى ستكون مستحيلة؛ لأن كل تحول كبير لن يحتاج انتظار ظهور ابتكار واحد فحسب، بل انتظار ظهور قائمة كاملة من براءات الابتكار تلك بشكل متناغم. أمّا من جهة أخرى، فإذا كانت الابتكارات موجودة بالفعل، وتؤدي وظيفة

أخرى، فإنَّ إعادة التوظيف ببساطة يمكن أن تفتح مسارات جديدة للتغير، فهذه القدرة على التغير هي قوة كلمات داروين الخمس.

بمعرفة أنَّ الكائنات القديمة كانت تعيش في الماء وهي تملك: رئات، وعظام أذرع، وأرساغ، وحتى أصابع، فإنَّ سؤالنا عن غزو الأسماك لليابسة يتغير، فبدلًا من «كيف يمكن للمخلوقات أن تتطور لتمشي على اليابسة؟» يصبح السؤال: «لماذا لم يحدث التحول في وقتٍ أقرب من تاريخ الكوكب؟»

تحمل الصخور مرةً أخرى الإجابات لمليارات السنين، فقد كانت جميع الصخور على كوكب الأرض تفتقر إلى شيءٍ واحد، حيث تحمل الصخور التي يعود تاريخها من 4 مليارات سنة وحتى قرابة 400 مليون سنة أدلة على وجود محيطات شاسعة وممرات بحرية أصغر، وعلى اليابسة، كانت توجد أنهار سريعة قادرة على تحريك الجلاميد والصخور. لكن الأهم من ذلك أنه لم يكن هناك دليل على وجود نباتات على اليابسة.

تخيل عالمًا بدون نباتات على اليابسة. تتحلل النباتات عندما تموت وتكوّن التربة. وللنباتات جذور تربط التربة ببعضها. كان ذلك عالمًا صخريًّا قاحلًا يفتقر إلى التربة، ويفتقر أيضًا لأي طعام يمكن أن تأكله الحيوانات.

ظهرت النباتات البرية لأول مرة في السجل الحفريّ منذ حوالي 400 مليون سنة، ثم ظهرت الكائنات الشبيهة بالحشرات بعد ذلك بوقت قصير.

أدى غزو النباتات لليابسة إلى خلق عالم جديد تمامًا، عالم يمكن

أن تزدهر فيه البق والحشرات.

تُظهر بعض أوراق النباتات الحفريّة تضررًا، ما يعني تلك الحشرات الأولى كانت تأكلها. ومع النباتات الموجودة على اليابسة جاءت المخلفات عندما ماتت وتعفنت.

أتاحت التربة الناتجة أن تصبح التيارات والبرك ضحلة بمثابة موائل للأسماك والبرمائيات.

السبب وراء عدم انتقال الأسماك ذات الرئات إلى اليابسة قبل 375 مليون سنة هو أنها لم تكن مضيافة حتى ذلك الحين، فقد غيرت النباتات والحشرات التي تبعتها كل شيء، وأصبحت النظم البيئية عندها صالحة للحياة بالنسبة إلى أي سمكة لديها القدرة على قضاء فترات قصيرة على الأرض. وعندما ظهرت بيئات جديدة، تمكنت أسلافنا من الأسماك البعيدة من اتخاذ تلك الخطوات الأولى، باستخدام الأعضاء التي ظهرت بالفعل في أثناء وجودها في الماء، فالتوقيت هو كل شيء.

أظهرت الدِّراسات الجيولوجية الحديثة كيف غيرت النباتات العالم، وأبرزها كيف أدى غزو النباتات للأرض إلى تغيير طبيعة الجداول التي كانت موجودة في العصر الديفوني، إذ تسمح النباتات ذات الجذور بتكوين التربة لتكوين ضفاف مستقرة للجداول الضحلة. لمزيدٍ من المناقشة والتحليل، انظر: «شكل الأرض في العصر الباليوزي كما شكله تطور النباتات».

M. R. Gibling and N. S. Davies, "Palaeozoic Landscapes Shaped by Plant Evolution," Nature Geoscience 5 (2012): 99—105

الفصل الثاني

أفكار جنينية



درس كارل لينيوس (1707–1778)، أبو علم التصنيف الحديث، مئات النباتات والحيوانات في أثناء حياته، ولم تترك تصنيفاته العلمية مجالًا كبيرًا للعاطفة إلّا في حالة واحدة. فمن بين آلاف الحيوانات التي درسها لينيوس، خص واحدًا منها بالذات بالازدراء والسخرية.

يعرف الأطفال السَّمندل والنيوط بأنها مخلوقات لطيفة ذات: عيون واسعة، ورؤوس كبيرة، وأربعة أطراف، وذيول طويلة. ولكن لينيوس، لسببٍ غير معروف، عدّها «حيوانات خبيثة بغيضة».

وإذا كان لينيوس يرى أن السَّمندل هو الحضيض في الخلق، فقد زعم آخرون أنها مخلوقات مهمة، وتكاد تكون سحريّة. تصور الفلاسفة من بليني الأكبر إلى القديس أوغسطين أن النيوط والسَّمندل مخلوقات وُلِدت من: الحمم البركانية، أو الجحيم، أو اللهب. بالنسبة لأوغسطين، كان السَّمندل دليلًا ماديًا على حقيقة اللعنة في النار، وكانت فكرة أوغسطين مستندة إلى الزّعم بأن السَّمندل مقاوم للهب أو قادر على الخروج من وسط النيران، وربما تكون تلك القوى الخارقة قد عكست بيولوجيتها، وكما يعلم علماء

الأحياء المائية وهواتها، فإنَّ بعض أنواع السَّمندل تميل للعيش تحت الجوانب السفلية المتعفنة من الجذوع. ومن المحتمل أن تلك الموائل الرطبة كانت مخفية عمن كانوا يجمعون الجذوع من أجل الحطب في أيام أوغسطين. وعندما كانوا يشعلون الجذوع المملوءة بالسَّمندل، كانت تخرج لهم وهي تتلوى فتفاجِئهم، ما أدى بلا شك إلى تكهنات مُرعِبة عن أعمالٍ شيطانية.

وبالرغم من أن هناك عددًا قليلًا نسبيًّا من أنواع السَّمندل في العالم، ربما خمسمائة نوع وفق بعض التقديرات الحديثة، فإنَّ أهميتها للوضع الإنساني يتمثل فيما هو أبعد من: الكراهية العميقة، وأفكار اللعنة، والحياة المتولدة من النار. لقد كانت حافزًا على ظهور نهج جديدٍ في فهم التحولات الكبرى في تاريخ الحياة.

في القرن التاسع عشر، جابت رحلات علماء الحيوان العالم لاستكشاف: القارات، والجبال، والغابات. ووصفوا الآلاف من: المعادن الجديدة، والأنواع، والتحف. وكثيرًا ما كانت سفن الاستكشاف تحمل معها عالم طبيعة كانت مهمته جمع الأنواع والصخور، ودراسة مظاهر الطبيعية التي تمر بها السفينة.

كانت الشخصيات البارزة في ذلك الوقت هم مَن كانوا في وضعٍ يُؤهلهم لتحليل العينات ونشرها التي تصل إلى الموانئ ومحطات القطار في: لندن، وباريس، وبرلين.

وإذا كان لعالِم حيوان ما حق مكتسب بالولادة، فهو أوجست دومريل (1812-1870)، الأستاذ في متحف التاريخ الطبيعي في باريس. ومثل والده آندريه الذي كان أيضًا أستاذًا في المتحف لفترة

طويلة، كان لديه شغف بالزواحف والحشرات.

أجرى الأب والابن الأبحاث معًا وتعاونا في بناء جَريئة في المتحف يمكنهم فيها مراقبة الكائنات الحية فضلًا عن الكائنات المحفوظة. نشر دومريل الأب تصنيفًا مهمًّا للمملكة الحيوانية مستخدمًا أوصاف ابنه التَّشريحية. وعندما تُوفي آندريه في عام 1860، انطلق أوجست يشفي غليله بوصف أنواع جديدة.

تلقى دومريل، في كانون الثاني (يناير) 1864، شحنة تحتوي ستة سمادل من فريق جمع العينات الذي كان يستكشف بحيرة خارج مكسيكو سيتي. كان السَّمندل بالغًا كبيرًا، وعلى عكس أي سمندل بالغ معروف في ذلك الوقت، كانت لديه مجموعة كاملة من الخياشيم الريشية التي تمتد مثل أعمدة الريش من قاعدة الجمجمة. حتى أن هذه المخلوقات كانت لديها عارضة على ظهرها تمتد إلى ذيل يشبه الزعنفة. كان المعنى الضمني واضحًا: في وجود الخياشيم وشكل الجسم المائي، كان ذلك السَّمندل البالغ يعيش في الماء.

لم يكن المستكشفون يعلمون أن السَّمندل كان لفترة طويلة جزءًا من ثقافة الأزتك. ربما كانت تلك الأنواع جديدة على العلوم، لكنها كانت في المكسيك من الأطعمة الشهية المفضلة، وكثيرًا ما كانت تُشوى في الأعياد والطقوس الخاصة.

اعتقد دومريل ـ متأثرًا بنظرية التطور التي اقترحها داروين حديثًا ـ أنَّ هذه البرمائيات المائية قد توفر أدلة حول كيفية تطور الأسماك للمشي على اليابسة. فوضع المخلوقات الجديدة في الجريئة التي بناها هو ووالده. ولحُسن الحظ، كان لديه ذكور وإناث، وبعد حوالي عام،

جعلها دومريل تتزاوج وتنتج بيضًا مخصبًا. وفي عام 1865، فقس البيض، وأنتج سمادل صغيرة صحتها جيدة. من السهل العناية بالسَّمندل، وفي الظروف المناسبة، لا يحتاج إلى الكثير من الطعام لفترات طويلة.

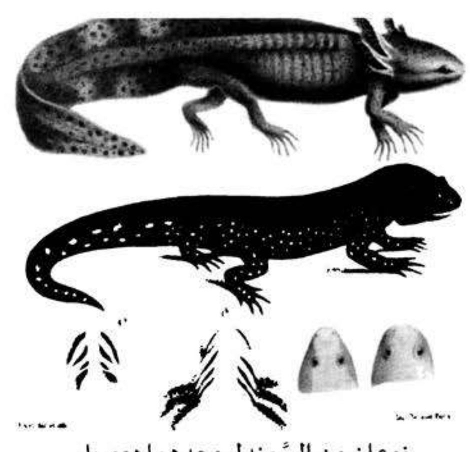
كان كل شيء يسير على ما يُرام مع تلك الوديعة، لذا تركهم دومريل وشأنهم.

في وقتٍ لاحق من ذلك العام نظر داخل الحظيرة، ولا بد أنه ظن لأول وهلة أن أحدًا ما قد عبث بالقفص؛ لأنه ساعتها كان يوجد به نوعان من السَّمندل:

أولًا: كانت هناك الآباء المائية البالغة الكبيرة ذات الخياشيم، ولكن كان هناك نوع آخر يعيش جانبهم. كان أولئك الآخرون كبار الحجم أيضًا، ولكنهم بدوا كأنهم من سكان اليابسة بالكامل، فليس لديهم خياشيم، ولا ذيل مائي، ولا شيء يشير إلى أنهم يستطيعون العيش في الماء. وعند النظر عن كثب إلى تشريحها، ومقارنتها بالأنواع الموصوفة بالفعل في الأدبيات العلمية، أدرك دومريل أن المخلوقات الجديدة كانت معروفة للعلماء قبل سنوات. كان لديها السمات الدقيقة لجنس سلمندر الخلد Ambystoma، وهو نوع معروف من السَّمندل كان يعيش بشكلٍ كامل على اليابسة.

كانت تلك الحيوانات مختلفة تمامًا عن بعضها، إلى درجة أنه، باستخدام تصنيف لينيوس، يمكن تصنيفها إلى جنسين مختلفين genera، وليس فقط نوعين species مختلفين. كان ذلك أشبه بما لو أن دومريل قد وضع حيوانات الشمبانزي في حظيرة ذات عام، ثم

عاد في العام التالي ليجد الغوريلا والشمبانزي يتعايشان بسعادة في القفص.



نوعان من السَّمندل وجدهما دومريل

هل ظهر شكل جديد من الحياة من لا شيء؟ هل حدث تحول عظيم في حظيرة دومريل في باريس؟ ما السحر الذي كانت تمارسه السمادل هذه المرة؟(24)

(24) أفضل طريقة لحكاية قصة دومريل هي من خلال مفاجأته الأولية، ثم حله النهائي للغز. بعد ذلك، أنشأ مستعمرة لتربية السمادل المكسيكية، وأعطاها بسخاء لأي باحث يريدها. يُحتمل أن يكون أحفاد تلك المجموعة موجودين في المختبرات حتى اليوم، وقد لا يبدو ذلك من هذا العنوان، لكن هناك وصف جيد لقصة دومريل في ج. مالسنسكي "السمندل المكسيكي".

G. Malacinski, "The Mexican Axolotl, Ambystoma mexicanum: Its Biology and Developmental Genetics, and Its Autonomous Cell-Lethal Genes," American Zoologist 18 (1978): 195–206.

ظهرت بعض أعمال دومريل المبكرة في كتاب أوجست دومريل: "حول تطور السمندل المكسيكي":

رواية القصص:

نظر الناس إلى الأجنّة، قرونًا عدة، بحدس مفاده: إنه في مكانٍ ما من عملية التحول من بيضة إلى حيوان بالغ ثمة أدلة على القوانين التي تجعل الأنواع مختلفة عن بعضها.

في الواقع، وفي الوقت الذي كان فيه دومريل محتارًا بشأن السَّمندل، كان يُنظر إلى نمو الجنين، سواء أكان سمكة، أم ضفدعًا، أم دجاجة، بِعَدِّه عدسة يمكن من خلالها رؤية التنوع البيولوجي لكل حيوان على وجه الأرض.

منذ أن نظر أرسطو داخل بيض الدجاج، أصبحت أجنّته موضع اهتمام. تُخلق الكتاكيت داخل حاوية خاصة بها يمكن فتحها مثل النافذة، كما يمكنك فتح ثقب في القشرة، وتمرير ضوء على جانب البيضة، ووضعها تحت المجهر لرؤية الجنين بالداخل، حيث يبدأ الجنين كتلةً صغيرة من الخلايا البيضاء توجد مباشرة فوق الصفار، وبمرور الوقت ينمو، وتظهر معالم مميزة تدريجيًّا، مثل: الرأس، والذيل، والظهر، والأطراف.

تبدو العملية كأنها رقصة مصممة بدقة. في البداية، تخضع البويضة المخصبة للانقسام، فتصبح خلية واحدة خليتين، واثنتان تصبحان أربعًا، وأربع تصبح ثمانٍ، وهكذا. ومع تكاثر الخلايا، يصبح الجنين في النهاية كرة من الخلايا. وفي حوالي أيام قليلة يتحول

M. Auguste Duméril, "On the Development of the Axolotl," Annals and Magazine of Natural History 17 (1866) : 156–57; و"تجارب على السمندل المكسيكي". "Experiments on the Axolotl," Annals and Magazine of Natural History 20 (1867): 446–49.

الجنين من كرة مجوفة إلى قرص بسيط من الخلايا محاطة بتراكيب تحميه، وتغذيه، وتهيئ البيئة المناسبة لنموه. ومن هذا القرص البسيط من الخلايا يخرج مخلوق كامل. فلا عجب أن التطور الجنيني كان مصدرًا للتأمل والبحث العلمي.[25]

زعم تشارلز بونيه (1720-1793) أن الجنين كان، في جوهره، كائنًا مصغرًا، ولكنه مكتمل التكوين. يقضي وقته في الرحم في تنمية الأعضاء الموجودة بالفعل. وكان ذلك «الأُنَيْسِيان» homunculus، كما كان يُدعى: الأساس لنظرته للتطور. حملت الإناث جميع الأجيال القادمة بداخلها. كانت الأُنَيسِيانات التي تحملها قادرة على النجاة من الكوارث، وبمرور الوقت، ظهرت أشكال جديدة من الحياة كرّة أخرى من الأجيال السابقة من الإناث، كما ستشهد المرحلة النهائية، في وقتٍ ما في المستقبل، ظهور أجنَّة من الأُنَيْسِيان في أرحام البشر.

وفي القرن التالي، فُحصت أنواع مختلفة من الأجنّة في المختبر، واستُخدمت تقنيات بصرية جديدة لفحصها. وفي حين تلاشت فكرة بونيه عندما رأى العلماء أجنّة حقيقية، فإنَّ السعي لتفسير كيف تُبنى كائنات مختلفة مثل: الفيلة، والطيور، والأسماك ظل قائمًا.

---

(25) يحظى مجال علم الأجنّة ببعض الكتب الدراسية الجيدة جدًا إلى درجة أنها دفعت البحث في هذا المجال. ومن بينهم مايكل بارسي وسكوت جيلبرت، بيولوجيا النُمو الجنيني:

Michael Barresi and Scott Gilbert, Developmental Biology (New York: Sinauer Associates, 2016);

ولويس وولبرت وشيريل تيكل، مبادئ النُمو الجنيني.

Lewis Wolpert and Cheryll Tickle, Principles of Development (New York: Oxford University Press, 2010).

في عام 1816، كان اثنان من طلاب الطب من بين أوائل من اكتشفا رؤى عميقة حول التنوع البيولوجي داخل الأجنّة. كان كل من كارل إرنست فون باير (1792-1876) وكريستيان باندر (1794-1865) من عائلات نبيلة من المناطق الناطقة بالألمانية في البلطيق. وعند دخولهما كلية الطب في فورتسبورج، استلهما أرسطو وشرعا في فحص أجنّة الدجاج. فرّخ باندر آلاف البيضات، وفتحها في أوقات مختلفة من التطور، ووضع الأجنّة تحت عدسة مكبرة ليرى كيف تتشكل الأعضاء. كان يتمتع بميزة واضحة على صديقه في تلك الأيام الأولى، فعائلته ثرية، وكان بإمكانه تحمل تكاليف بناء رفوف لحمل آلاف البيضات، وتوظيف مساعد لسحب الأجنّة، وتوظيف رسامين لنشر رسومات عالية الجودة. ولأنه لم يمتلك ثروة باندر، تراجع فون باير إلى الهامش.

كان التقدم التقنيّ في صالح باندر، حيث تمكن من الحصول على أفضل العدسات المكبرة لتقريب الأنسجة والخلايا. ومع وفرة الأجنّة من مختلف الأعمار، والعدسات الجديدة التي يمكن فحصها بها، رأى شيئًا لم يره أي إنسان من قبل، ولم يكن للأجنّة في مراحلها الأولى أعضاء يمكن تمييزها، وبالطبع لم تكن المصغرات التي تصورها بونيه. في المراحل المبكرة، لم تبدُ الأجنّة مثل الدجاج البالغ، بل كانت عبارة عن أقراص بسيطة من الخلايا تستقر فوق الصفار.

لم يكن باندر مهتمًا فقط بالشّكل الخارجي للأجنّة، بل أراد أن يرى ما يجري بداخلها. وعندما ركز النظر أكثر، لاحظ أن الجنين يبدأ قرصًا بسيطًا بحجم بضع حبات من الرمل. ومع ازدياد حجمه

خلال مسار النُّمو، يصبح القرص مكونًا في النهاية من ثلاث طبقات من الأنسجة، مركبة مثل صفائح فوق بعضها. يشبه الجنين في هذه المرحلة كعكة على شكل قرص مُؤلَّفة من ثلاث طبقات.



كارل إرنست فون باير

مع توافر آلاف البيضات تحت تصرفه، تتبع باندر ما حدث لكل طبقة من تلك الطبقات مع تطور أجنّة الكتاكيت ونموها من قرص بسيط مُؤلَّف من ثلاث طبقات إلى دجاجة بالغة لها: رأس، وأجنحة، وأرجل. لقد شاهد الأعضاء تظهر تدريجيًّا.

من خلال العمل بالعدسة المكبرة، ووضع رسومات تفصيلية لكل مرحلة ممكنة من التطور، رأى باندر مفهومًا موحدًا بسيطًا في هذه العملية المعقدة. يعود تنظيم الجسم بأكمله إلى هذه الطبقات الثلاث. ففي النهاية تؤدي الطبقة الداخلية إلى ظهور أعضاء الأمعاء والغدد المرتبطة بها. وتتحول الطبقة الوسطى لتصبح: العظام،

والعضلات، والطبقة الخارجية من الجلد، والجهاز العصبي. وبالنسبة لباندر وفون باير الذي كان متفرِّجًا مُرحِّبًا به على هذه الاكتشافات، كانت تلك الطبقات الثلاث بمثابة مبدأ تنظيمي أساسي لجسم الدجاجة الناشئ.

كان لدى فون باير حدس بأن هناك المزيد من الأفكار التي يمكن أن تُستخلص من تلك الطبقات. لكن لسوء الحظ، وبسبب افتقاره إلى التمويل، لم يتمكن من إجراء أبحاثه الخاصة إلا بعد مرور عقدٍ، عندما تولى منصب الأستاذية في جامعة كونيجسبيرج. وبفضل الدخل الذي جاءه من منصبه الجديد، أصبح الآن قادرًا على استكشاف المجهول الواسع الذي يحيط بأجنّة الأنواع المختلفة. وقد قاده شغفه أحيانًا لفعل أشياء غريبة. فمثلًا لكي يكشف عن العضو الذي يُنتج البويضات في الثدييات، ضحى بكلبةِ مديره. وفي حين أن اسم فون باير سيبقى إلى الأبد مرتبطًا باكتشاف أن بويضات الثدييات تأتي من بصيلات في المبيض، فإن التاريخ لم يذكر شيئًا عن شعور مديره تجاه أساليبه التجريبية.

تساءل فون باير: ما الآليات الفاعلة التي تجعل نوعًا ما من الحيوانات مختلفًا عن الآخر؟ فجمع أجنّة أكبر عدد ممكن من الأنواع، من الأسماك إلى السحالي والسلاحف. كان يستخرج الأجنّة من بيضها أو أرحامها، ويحفظها في قوارير تحتوي الكحول كمادة حافظة. ثم، مثل صديقه باندر من قبله، بدأ ينظر فيما هو مشترك بين جميع تطورات الحيوانات وما الذي يجعل كل نوع فريدًا.

وبفحص الأنواع المختلفة تحت العدسة المكبرة، اكتشف

ملاحظات أساسية حول التنوع الحيواني. بدأ تطور كل نوع بثلاث طبقات: طبقة داخلية، وطبقة خارجية، وطبقة وسطى. وعندما تتبع الطبقات، وجد أن مصيرها كان هو نفسه تمامًا. فقد كونت خلايا الطبقة الأعمق، عند قاعدة القرص، أعضاء الأحشاء والغدد المرتبطة بها. وشكلت الطبقة الوسطى: الكلى، والأعضاء التناسلية، والعضلات، والعظام. أمّا الطبقة الخارجية، فشكلت أعضاء الجلد والجهاز العصبي. لم يكن اكتشاف باندر الأول يتعلق بالدجاج فحسب، بل ينطبق أيضًا على الحياة الحيوانية في نطاقها الأوسع.

كشفت هذه الملاحظة البسيطة عن وجود علاقة شاملة بين كل عضو في كل أنواع الحيوانات المعروفة. سواء أكان ذلك المخلوق سمكة أبي شص في أعماق البحر أم قطرسًا محلقًا في السماء، فإن قلبه يأتي من خلايا الطبقة الوسطى، ومخه وحبله الشوكي من الطبقة الخارجية، وأمعاؤه ومعدته وأعضاؤه الهضمية من الطبقة الداخلية. هذه القاعدة أساسية جدًّا إلى درجة أنك إذا اخترت أي عضو في جسم أي حيوان على وجه الأرض، فيمكنك معرفة أي طبقة من الخلايا شكلته. مكتبة سُر مَن قرأ

ثم ارتكب فون باير خطأً. لقد نسي وضع ملصقات على عددٍ قليل من القوارير التي تحتوي الأنواع المختلفة. ولأنه لم يكن يعرف أي الأنواع كانت موجودة في أي قوارير، كان عليه أن يفحصها عن كثب لمحاولة التمييز بينها. وفي وصف الأجنّة غير المسمّاة، قال فون باير: «لعلها كانت سحالي، أو طيور صغيرة، أو ثدييات صغيرة جدًّا. إن تكوين الرؤوس والجذوع في هذه الحيوانات متشابه تمامًا.

والأطراف لمَّا تتشكل بعد في تلك الأجنّة. ولكن حتى لو كانت في المراحل الأولى من التطور، فإنها لا تشير إلى أي شيء؛ لأن أقدام السحالي والثدييات، وأجنحة، وأقدام الطيور، وأيضًا أيدي البشر وأقدامهم تتطور من نفس الشَّكل الأساسي».

من خلال خطأ التصنيف الذي تعرض له، رأى فون باير نظامًا للحياة الحيوانية يتكَشّف مع استمرار التطور، فعادة ما تخفي الأجسام البالغة أوجه التشابه العميقة بين مراحل التطور المبكرة. وفي حين أن البالغين، أو حتى الأطفال حديثي الولادة، يمكن أن يظهروا مختلفين تمامًا، فإنهم متشابهون جدًّا في المراحل الأولى من التطور.

تلك التشابهات الجنينية عميقة جدًّا حتى في تفاصيلها. فرأس السَّمكة البالغة لا يتشابه إلا في القليل الواضح مع: رأس السلحفاة، أو الطائر، أو الإنسان البالغ. ولكن بعد وقتٍ قصير من تشكل الجنين، تظهر لدى جميع هذه الأجنّة أربعة انتفاخات عند قاعدة الرأس. تظهر تلك الانتفاخات التي تُعرف بالأقواس الخيشومية، والتي يوجد بينها شق خارجي، في أي مخلوق يملك جمجمة عظمية. وفي الواقع، يشكل وجودها الأساس لتكوّن الأنواع المختلفة من الجماجم. وفي الأسماك، تشكل الخلايا الموجودة داخل: الانتفاخات، والعضلات، والأعصاب، والشرايين، وعظام الخياشيم المتعاقبة. أمّا الشقوق التي تفصل بين الانتفاخات، فتصبح الشقوق الخيشومية. وعلى الرغم من أن البشر ليست لديهم خياشيم، فإنَّ لدينا تلك الانتفاخات والشقوق في مراحلنا الجنينية. تتحول خلايا

الانتفاخات فينا إلى: عظام، وعضلات، وشرايين، وأعصاب تشكل أجزاء من: الفك السفلي، والأذن الوسطى، والحلق، والحنجرة. لا تصبح الشقوق شقوقًا كاملة أبدًا، ولكنها تُغلق لتصبح أجزاء من آذاننا وحلوقنا. فهي فينا ونحن أجنّة، وليس ونحن بالغون.

مثال تلو آخر - من الكُلية والمخ إلى الأعصاب والعمود الفقري - أصبحت حجة فون باير قوية وراسخة. تملك الأسماك والقروش قضيبًا من النسيج الضام يمتد من الرأس إلى الذيل أسفل الحبل الشوكي. مليء بمادة تشبه الهلام، ما يجعله يشكل دعمًا مرنًا للجسم. يتألف العمود الفقري للإنسان من فقرات، وهي كتل من العظام تفصلها عن بعضها الأقراص الفقرية. لا يوجد قضيب يمتد من رؤوسنا إلى الوركين. وبالرغم من ذلك، فإن أجنتنا تشبه بشكل أساسي أجنّة الأسماك والقروش، فهي تملك هذا القضيب. وفي أثناء النُّمو، ينقسم إلى كتل صغيرة تصبح في النهاية الجزء الداخلي من الأقراص الفقرية لدينا. إذا سبق لك أن انفتق لك قرص، وهي إصابة مؤلمة، فقد تضررت تلك البقية القديمة من التطور التي نشترك فيها مع الأسماك والقروش.

لفتت ملاحظات فون باير حول التشابه بين الأجنّة في المراحل المبكرة من الأنواع المختلفة انتباه داروين.

نُشرت أعمال فون باير في عام 1828، وعلم داروين بها بعد ثلاث سنوات، عندما غادر على متن سفينة H M S بيجل في رحلة حول العالم غيرت حياته. وعندما نشر كتابه: «أصل الأنواع» بعد ثلاثة عقود، قدم الأجنّة دليلًا على نظريته في التطور. بالنسبة لداروين،

حقيقة أن الكائنات المختلفة مثل: الأسماك، والضفادع، والبشر لديها نقطة بداية مشتركة تعني أنها تشترك في تاريخ واحد. ما الذي يمكن أن يكون دليلًا أفضل على السلف المشترك للأنواع المختلفة من المراحل الجنينية المشتركة في التطور الذي تنشأ منه؟[26]

بعد اكتشافات فون باير حول الأجنّة، اكتشف العالم الألماني إرنست هِيكل (1834–1919)، بعد جيل من فون باير، وجود صلة بين مراحل التطور الجنينية والتاريخ التطوري. تدرب هِيكل ليصبح طبيبًا، لكنه لم يستطع تحمل رؤية الناس المرضى، لذلك ذهب إلى جينا للدراسة على أحد كبار علماء التَّشريح المقارن. وتغيرت حياته عندما قرأ والتقى بتشارلز داروين.

نقّب هِيكل في مملكة الحيوان بحثًا عن الأجنّة، وأنتج أكثر من مائة دراسة تصف وتوضح المراحل الجنينية للأنواع المختلفة. لقد تصور وجود علاقة محكمة بين الفن والحياة: كان تنوع الحياة شكلًا من أشكال الفن بالنسبة له. وقد أنتج بعضًا من أجمل المطبوعات الحجرية الملونة على الإطلاق. تعكس رسوماته الغزيرة للشعاب المرجانية والأصداف والأجنّة عصرًا كان فيه الرسم التَّشريحي الدقيق يربط بين العلم وتذوق الجمال. كانت الحفاوة بالأجنّة على وجه الخصوص ليس فقط لجمالها، ولكن أيضًا بسبب طريقة ارتباطها بنظرية داروين الجديدة. لقد صاغ هِيكل، صاحب الكلمات التي يُستشهد بها دائمًا، عبارة تربط بين الاثنين ظلت باقية مثل لازمة

(26) يعتمد حديثي عن فون باير (بما في ذلك اقتباسه عن الخطأ في التعرف على الأجنّة في الأنابيب) وباندر جزئيًا على العمل التاريخي لروبرت ريتشاردز، وهو مُتاح على الإنترنت على الرابط الآتي: home.uchicago.edu/~rjr6/articles/von%20Baer.doc.

مُقفاة عند العديد من الذين درسوا علم الأحياء في القرن العشرين: «يُلخص تطورُ الجنين [تاريخ الكائن الحي Ontogeny] تطورَ السلالة [التاريخ التطوري phylogeny]».[27]

كان ادِّعاء هِيكل هو أنَّ الأجنّة الحيوانية، في أثناء نموها، تحاكي التاريخ التطوري للمخلوق: يشبه جنين الفأر على التوالي دودةً، ثم سمكةً، ثم برمائيًّا، ثم زاحفًا. تكمن الآلية التي تُنتج هذه المراحل في الطريقة التي ظهرت بها السمات الجديدة في التطور. واقترح أن السمات التطورية الجديدة كانت تُضاف إلى المراحل النهائية في تطور الأجنّة، على سبيل المثال: نشأت البرمائيات عن طريق إضافة سمات خاصة بالبرمائيات إلى المراحل النهائية من تطور أسلاف الأسماك، وسمات الزواحف إلى سمات البرمائيات، وهكذا. وبمرور الوقت، وفق هِيكل، أدت هذه العملية إلى التطور الجنيني الذي يحاكي التاريخ التطوري.[28]

---

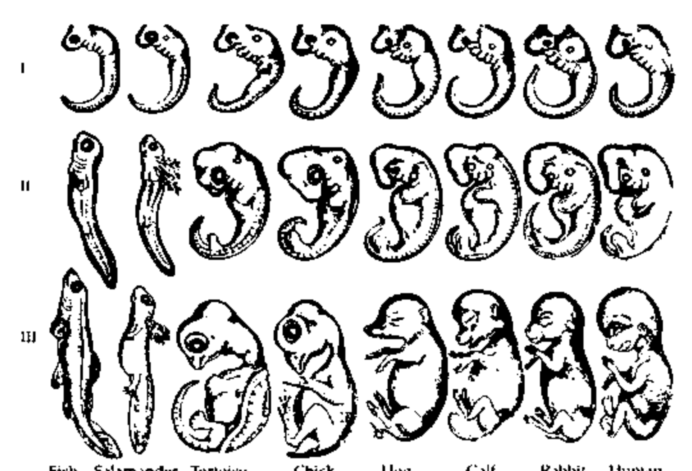
(27) في كتاب تطور الأجنة وتطور السلالات لستيفن جاي جولد (Cambridge, MA: Belknap Press, 1985) تاريخ رائع في علم الأجنّة في النصف الأول منه، حيث يذكر أعمال فون باير، وهيكل، ودومريل. هناك ورقة تقييم قصيرة تعد بمثابة قراءة تالية رائعة:

B. K. Hall, "Balfour, Garstang and deBeer: The First Century of Evolutionary Embryology," American Zoologist 40 (2000): 718–28

(28) على مر السنين، وفي حين تعلم الكثيرون أفكار هِيكل في المدرسة، كان لدى العلماء في هذا المجال مزيج من الحب والكراهية تجاهه: كان بعضهم من التابعين لعمله، في حين اعتقد آخرون، مثل: جارستانج، أنه محتال. تحمل الكتب التاريخية الحديثة مجموعة متنوعة من وجهات النظر. كما رأينا في كتاب روبرت ريتشاردز، المعنى المأساوي للحياة: إرنست هِيكل والصراع على الفكر التطوري:

(Chicago: University of Chicago Press, 2008).

يعتقد بعض علماء الأجنّة المعاصرين أن بعض رسومات هِيكل الأصلية كانت، بعبارة ألطف، مرسومة للتأكيد على أفكاره الرئيسة:



مقارنة هيكل للتطور الجنيني للأنواع المختلفة. كانت تلك رسمة مؤثرة، ولكنها مثيرة للجدل. زعم البعض أنه بالغ في التأكيد على أوجه التشابه بين الأجنّة، وإنه منح نفسه الحرية في رسوماته.

مَن سيحتاج إلى حفريّات وسيطة لتتبع تاريخ الحياة إذا كان من الممكن قراءته في الأجنّة، كما افترض هِيكل؟ كانت فكرة هيكل مؤثرة جدًّا إلى درجة أنها دفعت الناس إلى الذهاب في بعثات للحصول على أجنّة من أنواع مختلفة. في إحدى تلك البعثات، رحلة روبرت فالكون سكوت الاستكشافية إلى أنتاركتيكا عام 1912 للوصول إلى القطب الجنوبي، انهمك ثلاثة أعضاء بالبحث عن بيض البطريق الإمبراطور. اعتقد المستكشفون أن أجنّة طيور البطريق الإمبراطور التي كانت تعد بدائية في ذلك الوقت، ستحمل أدلة

M. K. Richardson et al., "Haeckel, Embryos and Evolution," Science 280 .(1998): 983–85

حول كيفية نشوء الطيور من الزواحف. ففي موضعٍ ما من تطورها الجنيني ستكون هناك مرحلة تشبه فيها أسلافها الزواحف.

في منتصف فصل الشتاء الجنوبي، غادر أفراد الطاقم الثلاثة في رحلة على المزالج مدة شهر من قاعدتهم إلى كيب كروزر، حيث تُوجد مستعمرة البطاريق. في ظلام دامس، ودرجات حرارة تنخفض إلى ستين درجة فهرنهايت تحت الصفر، كاد الثلاثة أن يموتوا مرات عدة عندما طارت خيامهم، أو عندما انزلقوا في الشقوق. كتب أحدهم، وهو أبسلي شيري جارارد، في كتابه الكلاسيكية عن الرحلة، **أسوأ رحلة في العالم**:[29] إن الفريق تمكن من العودة إلى المعسكر ومعه ثلاث بيضات بطريق. فقدت البعثة في وقتٍ لاحق سكوت وأربعة من أفراد الطاقم، بما في ذلك اثنان من رفاق شيري جارارد من رحلة البطريق، في محاولتهم المأساوية والفاشلة للوصول إلى القطب. بعد ذلك عاد شيري جارارد إلى بريطانيا، وحاول تسليم البيض إلى المتحف البريطاني. جعله المتحف ينتظر في القاعة ساعات عدة ليقرروا ما إذا كانوا سيقبلون البيض أم لا. أخذوها على مضض، ولكن كما كتب شيري جارارد إلى رئيس المتحف لاحقًا: «لقد سلمتكم أجنّة كيب كروزر التي كادت أن تكلف ثلاثة رجال حياتهم، وكلفت رجلًا منهم صحته... لم يقل ممثلكم حتى كلمة شكر».

---

(29) كتاب أبسلي شيري جارارد، **أسوأ رحلة في العالم** (London: Penguin Classics, 2006). هو أحد كلاسيكيات أدب الرحلات الاستكشافية. قرأته قبل رحلتي الأولى إلى القطب الجنوبي. وقد جعل ماكموردو ساوند، وهوت بوينت، وجبل إريبُس تبدو وكأنها مناظر مألوفة عندما رأيتها للمرة الأولى.



أبسلي شيري جارارد (على اليمين) بعد عودته من أسوأ رحلاته للحصول على بيض البطريق

السبب وراء تردد المتحف في قبول البيض هو أنه في الفترة ما بين رحيل البعثة إلى القطب الجنوبي وعودة يشيري جارارد، فقدت نظرية التلخيص التي وضعها هِيكل مصداقيتها على نطاق واسع، فضلًا عن ذلك، طعنت اكتشافات جديدة في الطبيعة البدائية المفترضة لطيور البطريق. لقد أثار هِيكل اهتمامًا كبيرًا بعلم الأجنّة إلى درجة أنه زرع بذور سقوطه. فبسبب حرصهم على اكتشاف التاريخ التطوري من خلال فحص الأجنّة، درس العلماء التطور الجنيني في أنواع مختلفة. وفي معظمها، ظلت فكرة فون باير عن التشابه بين أجنّة الأنواع المختلفة متماسكة، وإن كانت هناك بعض الاستثناءات. لكن البيانات الجديدة لم تدعم نظرية التلخيص التي وضعها هِيكل، في الواقع، حدث العكس تمامًا. فلا يمكن رؤية

سلف مشترك في أي مرحلة من مراحل التطور الجنيني. قد تشبه الأجنّة البشرية في بعض المناحي أجنّة الأسماك، كما اقترح فون باير، لكنها لا تشبه أبدًا في تطورها أحد أسلافنا، سواء أكانت سمكة ذات أرجل أم قردًا جنوبيًّا Australopithecus، ولا يبدو جنين الطائر مثل الأركيوبتركس في أثناء نموه.

كانت فكرة هِيكل خاطئة، لكنها أرشدت أبحاث عدد لا يُحصى من العلماء. ولا تزال تتردد حتى في بعض الأوساط اليوم، على الرغم من أنها لم تكن موضوعًا للبحث العلمي منذ أكثر من قرن، ولعل التأثير الأكبر لِهيكل كان في الشخص الذي كره فكرته أكثر من غيره.

سمندل المكسيك:

كان والتر جارستانج (1868-1949) يحتقر فكرة هِيكل إلى درجة أنه طور نقدًا لها أدى إلى طريقة جديدة للتفكير في تاريخ الحياة. كان لديه اهتمامان دائمان، وإن كانا بعيدين عن بعضهما كل البُعد، وهما الشراغف والشعر. وعندما لم يكن يجري الأبحاث العلمية على اليرقات، كان يكتب القصائد الفكاهية والأغاني عنها. جمع بين شغفيه في كتاب نُشر بعد عامين من وفاته بعنوان: «**أنواع اليرقات وقصائد أخرى**»،[30] حيث حول مهنة البحث العلمي إلى شعر.

لا يبدو «سمندل المكسيك ويرقة الغلاليات» عنوانًا واعدًا لقصيدة، فهو يشير إلى نوع من السَّمندل (سمندل المكسيك axolotl) وحيوان يشبه الشرغوف (يرقة الغلاليات ammocoete)

(30) والتر جارستانج، أنواع اليرقات وقصائد أخرى (Oxford: Blackwell, 1951)، آعادت نشره مطبعة جامعة شيكاغو في عام 1985.

لكن الفكرة التي عبَّر عنها في القصيدة غيّرت المجال، ورسمت نهج برامج البحث لعقود. لا تفسر فكرة جارستانج ما حدث في حظيرة دومريل السحرية فحسب، بل تفسر أيضًا بعض الثورات التي جعلت وجودنا على هذا الكوكب ممكنًا. وبالنسبة لجارستانج، لم تكن مراحل نموِّ اليرقات بمثابة انعطافات بسيطة في النُّمو، بل كانت غنية بالقطْع بأدوات تاريخ الحياة وإمكانات مستقبلها.

تعيش معظم السمادل في الماء طوال فترة نموها تحت الجوانب السفلية للصخور، أو تحت الأغصان المتساقطة في الجداول، أو في قاع البرك. تفقس يرقاتها برأس عريض وأطراف صغيرة تشبه الزعانف وذيل عريض. يبرز عنقود من الخياشيم من قاعدة الرأس، مثل: مجموعة من الريش تمتد من عمود منفضة الريش. يكون الخيشوم عريضًا ومسطحًا، مما يزيد من مساحة السطح الذي يمكنه من خلاله امتصاص الأوكسجين من الماء. بأطرافها التي تشبه المجاديف، وذيولها العريضة التي تشبه الزعانف، وخياشيمها، من الواضح أن تلك المخلوقات مصممة للحياة في الماء. تخرج يرقات سمندل المكسيك بالقليل جدًّا من الصفار داخل البيضة، ما يعني أنها يجب أن تتغذى بنهم إذا أرادت النُّمو والتطور. يعمل الرأس العريض بمثابة قمع شفط ضخم، وعندما تفتح أفواهها وتوسع فجواتها، يُسحب الماء وجزيئات الطعام إلى الداخل.



صورة لوالتر جارستانج في بداية كتابه أنواع اليرقات وقصائد أخرى

ثم، عند الانمساخ، يتغير كل شيء. تفقد اليرقات خياشيمها وتعيد تشكيل: الجمجمة، والأطراف، والذيل، وتتحول من كائنٍ مائي إلى كائن بري. تسمح الأنظمة الجديدة من الأعضاء لتلك المخلوقات بالعيش في بيئة جديدة، فالتغذية على اليابسة تختلف عن الماء، وتراكيب الرأس التي كانت مفيدة جدًّا في امتصاص الفريسة داخل الفم في الماء لا تعمل في الهواء. لذا تعيد المخلوقات تشكيل جماجمها للسماح لألسنتها بالخروج وسحب فرائسها. تبدل بسيط يؤثر في الجسم بأكمله: الخياشيم، والجمجمة، والجهاز الدوري. والتحول من الماء إلى اليابسة، وهو الذي حدث على مدى ملايين السنين في أسلافنا من الأسماك، يحدث خلال بضعة أيام من الانسلاخ في هذه المخلوقات.(31)

بعد ملاحظة هذه التغييرات المذهلة التي طرأت على السمادل في

---

(31) نوقشت بيولوجيا البرمائيات وانمساخها في:
W. Duellman and L. Trueb, Biology of Amphibians (New York: McGraw-Hill, 1986); and D. Brown and L. Cai, "Amphibian Metamorphosis," Developmental Biology 306 (2007): 20–33.
يعد كتاب دويلمان وتروب وصفًا شاملًا للتشريح والتطور والنُّمو الجنيني.

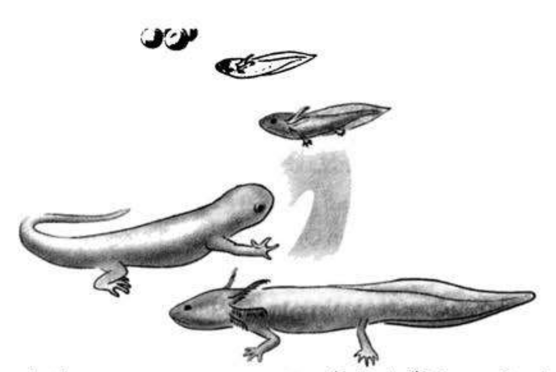
جَريثته، تتبع دومريل دورة حياتها بأكملها. عادة ما تتحول تلك السمادل - السمادل المكسيكية في قصيدة جارستانج - من يرقات مائية إلى كائنات بالغة برية. ولكن، كما اكتشف دومريل لاحقًا، فإنها لا تفعل ذلك دائمًا، إذ لديها مساران مختلفان، اعتمادًا على البيئة التي تعيش فيها كيرقات. السمادل التي تنمو في بيئة جافة تُجري عملية انسلاخ وتفقد جميع سماتها المائية لتصبح بالغة على اليابسة. أمّا تلك التي تنمو في البيئات الرطبة لا تخضع أبدًا للانسلاخ، وتنمو لتبدو وكأنها يرقات مائية كبيرة، مع مجموعة كاملة من الخياشيم، وذيل يشبه الزعنفة، وجمجمة عريضة مناسبة للتغذية في الماء. لم يكن دومريل يعلم في ذلك الوقت أن العينات التي حصل عليها من المكسيك كانت عبارة عن حيوانات بالغة كبيرة لم تخضع للانسلاخ بسبب بيئتها الرطبة. أمّا نسلها الذي نشأ في الجريثة الجافة، فقد خضع للانسلاخ، وفقد جميع سمات اليرقة المائية في تلك العملية.

كان السحر الذي حدث في حظيرة دومريل بمثابة تحول بسيط في الطريقة التي تنمو بها تلك الحيوانات.

نحن نعلم الآن أن المحفز الرئيس للتحول هو ارتفاع مستويات هرمون الغدة الدرقية في مجرى الدم. يتسبب الهرمون في موت بعض الخلايا، وتكاثر خلايا غيرها، وتحوّل خلايا أخرى إلى أنواع مختلفة من الأنسجة. إذا ظلت مستويات الهرمون ثابتة، أو إذا توقفت الخلايا عن الاستجابة له، فلن يحدث الانسلاخ، وستحتفظ المخلوقات بخصائصها اليرقيّة حتى مرحلة البلوغ. يمكن للتغيرات في النُّمو، حتى الصغيرة منها، أن تنتج تحوّرات منسقة في الجسم

بأكمله.

من خلال متابعة عمل دومريل، روّج جارستانج لمبدأ عام، فالتغيرات الصغيرة وقت النُّمو يمكن أن تكون لها نتائج كبيرة على التطور. لنفترض أن هناك تسلسلًا لمراحل النُّمو في الأسلاف. إذا تباطأ النُّمو أو توقف مبكرًا، فسيبدو الأحفاد مثل صغار أسلافهم. في السمادل، قد يؤدي هذا التغيير إلى جعل أجسامها تبدو مثل يرقات مائية، فتحتفظ بالخياشيم الخارجية وأطراف بها عدد أقل من الأصابع. من جهة أخرى، إذا جرى تمديد النُّمو أو تسريعه، تظهر أعضاء وأجسام جديدة متضخمة. تبني القواقع أصدافها عن طريق إضافة لفات حلزونية في أثناء النُّمو. وقد تطورت بعض أنواع القواقع عن طريق تمديد وقت النُّمو، أو عن طريق النُّمو بشكلٍ أسرع. تحتوي هذه القواقع الجديدة على عددٍ أكبر من اللفات من أسلافها. ذات العملية تفسر وجود مجموعة واسعة من الأعضاء الكبيرة أو المتضخمة، سواء أكانت قرون الأيائل أم أعناق الزرافات الطويلة.



يمكن للسمندل أن يُبطئ أو يوقف نموه ويغير جسمه بشكل كبير.

يمكن أن يؤدي التلاعب بالتطور الجنيني إلى ظهور أنواع جديدة من المخلوقات مختلفة بشكلٍ دراماتيكي. بعد جارستانج، وضع العلماء تصنيفات للطرق التي يمكن بها تغيير توقيت النُّمو لإنتاج تغييرات تطورية. فإبطاء معدل النُّمو عملية مختلفة عن إنهائه مبكرًا، يمكن أن يؤدي كل من النمطان إلى نتائج مماثلة - نسل منقوص النُّمو - ولكن السببية مختلفة. تنطبق نفس العلاقة بين السببية والنتائج على العملية التي يمكن أن تنتج من خلالها سمات أضخم أو أكبر عندما يجري تسريع عملية النُّمو أو مدها.

وفي البحث عن الأسباب المختلفة، بحث العلماء عن الجينات التي قد تتحكم في هذه الأحداث أو عن الهرمونات، مثل: هرمون الغدة الدرقية التي قد تحفز حدوثها. أصبح هذا المدخل لدراسة النُّمو والتطور، المعروف باسم: «التغاير الزمني»[32] heterochrony (من الكلمة اليونانية hetero التي تعني «الآخر» و chronosالتي تعني «الزمن») مجالًا قائمًا بذاته من فروع البحث. خلال أكثر من قرن من المقارنات بين الأجنّة والبالغين من مختلف

---

(32) هناك عدد كبير من المؤلفات عن التغاير الزمني من أيام جارستانج، إن لم يكن قبل ذلك. وقد اقترحت تصنيفات كاملة لمعدلات وتوقيت النُّمو. للحصول على لمحة سريعة عن بعض الأساليب الرئيسة (والمراجع الجيدة)، انظر:

P. Alberch et al., "Size and Shape in Ontogeny and Phylogeny," Paleobiology 5 (1979): 296–317; Gavin DeBeer, Embryos and Ancestors (London: Clarendon Press, 1962); and Stephen Jay Gould, Ontogeny and Phylogeny (Cambridge, MA: Belknap Press, 1985).

كان لكتاب جولد تأثير كبير في الثمانينيات، ما أدى إلى تجدد الاهتمام بهذا النهج.

الأنواع، أظهر علماء الحيوان وعلماء النبات كيف يمكن للتغيرات في توقيت أحداث النُّمو أن تؤدي إلى ظهور أنواع جديدة من الأجسام في الحيوانات والنباتات.

وقد كشف جارستانج نفسه عن مثال مذهل من تاريخنا - عندما كان أسلافنا ديدانًا.

يرقة الغلاليّات:

استكشفت قصيدة جارستانج «السَّمندل المكسيكي ويرقة الغلاليّات» اثنتين من الثورات النُّموذجية التي حدثت من خلال الاحتفاظ بسمات اليرقات في سياق النُّمو.

يُظهر السَّمندل المكسيكي حجم التغييرات التي تحدث عندما يتوقف النُّمو مبكرًا. تصبح اليرقة، وهي مرحلة انتقالية في حياة السَّمندل، نقطة النهاية للنمو. يرقة الغلاليّات هي حيوان صغير يشبه الدودة وله عمود فقري. وفي حين أنها قد تعيش على امتصاص الطين بهدوء في قاع الأنهار والجداول، فإن بيولوجيتها تحكي قصة أكبر بكثير.

منذ أكثر من ألفي عام، تعرف أرسطو على مئات الأنواع من: القواقع، والأسماك، والطيور، والثدييات ووصفها. وميز الحيوانات التي بها دماء (الإنهاميا enhamia) عن الحيوانات عديمة الدماء (الأنهاميا anhamia). يشابه هذا التمييز بشكلٍ كبير ما نسميه اليوم التمييز بين الفقاريات واللافقاريات. هناك نوعان من الحيوانات على هذا الكوكب: تلك التي تملك عمودًا فقريًّا، والتي لا تملك

عمودًا فقريًّا. تختلف أجسام: البشر، والزواحف، والبرمائيات، والأسماك اختلافًا جوهريًّا عن أجسام الذباب والمحار. في قلب هندسة الفقاريات يوجد ما رآه فون باير في: الأسماك، والبرمائيات، والزواحف، والطيور، كل حيوان فقاري في مرحلةٍ ما من تطوره الجنيني كانت لديه شقوق خيشومية، وقضيب غضروفي يدعم الجسم، وحبل عصبي يمتد فوقه. وكما عرفنا منذ فون باير، فإن بعض هذه السمات قد تُحجب أو تختفي في الجسم البالغ، ولكنها تبقى موجودة في المرحلة الجنينية. كانت الافتراضات أن سلف الفقاريات كان مخلوقًا بسيطًا يشبه الدودة وله هذه السمات الثلاث.

بالنسبة لجارستانج والعديد من معاصريه، كان السؤال الرئيس هو كيف جاء هذا التكوين الجسمي للوجود. هل كانت هناك حيوانات لافقارية تمتلك هذه السمات بشكل ما؟ وإذا كانت الحال كذلك، فكيف تطور فرعنا في شجرة الحياة من تلك اللافقاريات؟ لا تملك أجنّة ديدان الأرض شقوقًا خيشومية أو قضيبًا غضروفيًّا ولا البالغة منها. ولا الحشرات، أو المحار، أو نجم البحر، أو معظم الحيوانات الأخرى التي ليس لها عمود فقري. جاءت الإجابات من حيوان غير مُتوقع على الإطلاق، وهو حيوان يشبه كتلة من الآيس كريم ويقضي حياته بأكملها تقريبًا ملتصقًا بالصخور في المحيط.

يُوجد حوالي ثلاثة آلاف نوع معروف من بخّاخ البحر sea squirt في محيطات العالم. تكون بعض الأنواع على شكل غَرفَة من الآيس كريم يعلوها هيكل كبير على شكل مدخنة، وتبقى، أحيانًا لعقود ملتصقة بالصخور الموجودة تحت السطح تضخ الماء ببساطة.

يُسحب الماء من أنبوب كبير في الأعلى ويمر عبر الجسم، ويُطرد من أنبوب يبرز من وسط الجسم. وعندما ينتقل الماء عبر أجسامها، تصفي الجزيئات لتتغذى عليها. يتخذ بخّاخ البحر عددًا من الأشكال، بدءًا من التكتلات وحتى الأنابيب الملتوية، لكن ليس له: رأس، أو ذيل، أو ظهر، أو مقدمة واضحة.

لا يمكنك أن تتخيل مخلوقًا أبعد منه عن القدرة على رواية قصة أحد أهم الأحداث في تاريخ البشرية.

كان جارستانج مهتمًا بيرقاتها. لقد استكشف شيئًا رائعًا، رآه علماء الأحياء الروس لأول مرة في أواخر القرن التاسع عشر عندما تفقس بخّاخات البحر من البيضة، تكون شراغيفَ تسبح بحرية. ولا تغوص إلى قاع عمود الماء وتلتصق بالصخور إلا بعد التحول. وإذا سمحت لخيالك أن يأسره شرغوف، ستجدهُ يسبح في الأرجاء ولا يبدو أبدًا مثل الحيوان البالغ. فله رأس كبير، ويناور عن طريق هز ذيله الطويل. ويمتد داخل جسمه حبل عصبي على طول ظهر الحيوان، ويمتد قضيب من النسيج الضام من الرأس إلى الذيل. حتى أن له شقوقًا خيشومية في قاعدة الرأس. وبهذا تكون السمات الثلاث العظيمة التي تشكل أساس السلف المزعوم للحيوانات ذات العمود الفقري موجودة في يرقات بخّاخ البحر.[33]

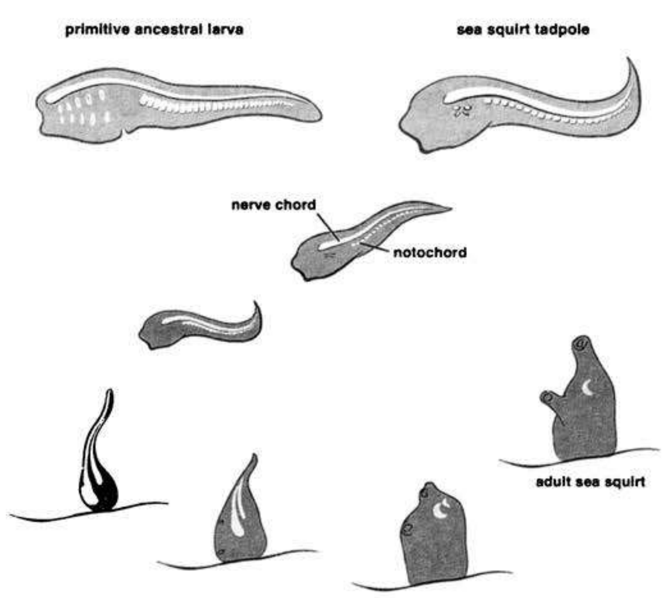
---

(33) مؤخرًا، كشفت تحليلات الجينوم أن الغلاليات، بما فيها بخّاخ البحر، هي أقرب الأحياء للفقاريات. انظر:

F. Delsuc et al., "Tunicates and Not Cephalochordates Are the Closest Living Relatives of Vertebrates," Nature 439 (2006): 965–68.

يعتمد فهمنا لأصول الفقاريات أيضًا على كائن حي آخر، وهو السُّهيم الذي نُوقشت جيناته في:

ومن ثم تفقد يرقات بخّاخ البحر كل شيء، أو على الأقل تفقد السمات التي تعد مهمة من وجهة نظرنا المتمركزة حول الإنسان. بعد بضعة أسابيع، يسبح الشرغوف إلى قاع عمود الماء. وفي أثناء نزوله، يفقد الذيل، والحبل العصبي، وكل قضيب النسيج الضام تقريبًا، ويعدل الشقوق الخيشومية لتصبح جزءًا من جهاز ضخ الماء. ويلتصق بالصخور ليقضي بقية أيامه في مكانٍ واحد يضخ الماء. يتحول الشرغوف، وهو مخلوق له تصميم جسمنا الفقاري إلى شيء كان يُخلط بينه وبين النباتات.



يبدو بخَاخ البحر كأنه كتلة بلا ملامح، ولكنه يبدأ نموه بالعديد من السمات التي نشترك فيها.

L. Z. Holland et al., "The Amphioxus Genome Illuminates Vertebrate Origins and Cephalochordate Biology," Genome Research 18 (2008): 1100–11

اقترح جارستانج أنَّ التغير في توقيت التطور كان بمثابة خطوة رئيسة أولى في التحول من اللافقاريات إلى الفقاريات. لا يشبه الإنسان البالغ أو السَّمكة بخاخ البحر، بل سيعد الكثيرون المقارنة مهينة. لكن الزُّبدة في اليرقات. جاء أسلاف جميع الفقاريات عن طريق إيقاف نمو بخّاخ البحر في مرحلة مبكرة، وتجميد سمات مرحلة اليرقات، وترك المخلوق ينمو بتلك السمات إلى مرحلة البلوغ. وكانت النتيجة حيوانًا بالغًا يشبه شرغوف أسلافه من بخّاخات البحر. هذا المخلوق الذي يجمع: الحبل العصبي، وقضيب النسيج الضام، والشقوق الخيشومية، في جسم حيوان يسبح بحرية، سيصبح الأب لجميع: الأسماك، والبرمائيات، والزواحف، والطيور، والثدييات.[34]

صورة للتغير:

تكثر الأمثلة على التطور الذي يحدث نتيجة التغيرات في توقيت تسلسل النُّمو، فمن الصعب أن تفتح بعض المجلات العلمية هذه الأيام، ولا ترى أبحاثًا عنها. ويمكن القول: إنَّ أحد أهم الأمثلة هو أيضًا أحد أكثرها خصوصية.

كانت السنوات الممتدة بين عامي 1820 و1930 عصرًا للأفكار الكبيرة في علم الأحياء. بحث فون باير، وهيكل، وداروين، وجارستانج، وعددٌ لا يُحصى غيرهم في: علوم التَّشريح،

(34) للاطلاع على تقييم عام لفرضية جارستانج ومشكلة أصول الفقاريات، انظر:
Henry Gee, Across the Bridge: Understanding the Origin of Vertebrates (Chicago: University of Chicago Press, 2018).

والحفريّات، والأجنّة عن قواعد تفسر لماذا تبدو الحيوانات بالشّكل الذي تبدو عليه. وفي الوقت ذاته، أصبحت الآليات التي أدت إلى تنوع الحياة معروفة.

وفي هذا الوسط الفكري، ارتقى عالم التّشريح السويسري أدولف نيف (1883–1949) في المناصب الأكاديمية، حيث درس على بعض أبرز العلماء المعاصرين في سويسرا وإيطاليا. وكان هدفه، كما وصفه لأخيه في عام 1911، هو وضع «علم عام لأشكال الكائنات الحية الموضوع الذي أملك عددًا من الأفكار الجديدة حوله».

كان نيف عالم تشريح دقيقًا يعرف التأثير الذي يمكن أن تحدثه الصورة الجيدة في حسم الجدل العلمي. ومع ذلك، فقد كانت حياته عبارة عن الكثير من الجدل. وكما كتب إلى أخيه: «إن سلوكي يُنفّر معظم الناس، البعض يقدرني في كل وقت، والبعض يتقبلونني كمفكر خالص. إنني أتوقع أن ألقى الأعداء دائمًا لا الأصدقاء»، وفي رسالة سابقة، أكد أنه: «لا توجد في سويسرا وفرة من مثقفي الدرجة الأولى، وهو ما أعدّ نفسي إياه». بمثل هذا السلوك، لم يتمكن نيف أبدًا من العثور على عمل في سويسرا، لذلك أمضى معظم حياته المهنية في وظيفة بالقاهرة.

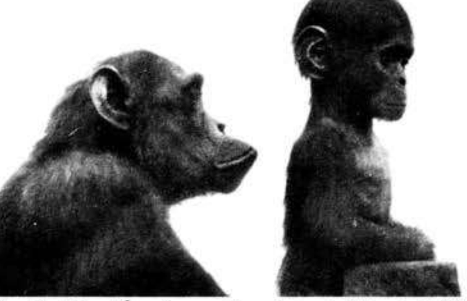
وفي أثناء وجوده في القاهرة، طوّر نيف نظرية للتنوع البيولوجي تعكس فلسفة أفلاطون قبل ألفي عام. في محاورة **الجمهورية**، رأى أفلاطون أن جميع الأشياء المادية ليست سوى مظاهر مادية للجواهر المثالية، فالكونيات الخالدة التي تكمن وراء كل التنوع. يمكن، في نظر أفلاطون، رد تنوع جميع الأشياء، من كؤوس الشرب إلى المنازل

إلى جوهر ميتافيزيقي اشتُق منه كل مظهر مادي. طبّق نيف هذه الفكرة على التنوع البيولوجي. وفي نظريته عن المورفولوجية المثالية، كما أصبحت معروفة، فإنَّ للحيوانات أيضًا جوهرًا يسبق تنوعها الجسماني. بالنسبة لنيف، يظهر هذا الجوهر في التشابه بين الحيوانات في أثناء النُّمو الجنيني.

نُسي إطار نيف النظري إلى حدٍّ كبير، واستبدل ببيانات جديدة من علم الوراثة والعلاقات التطورية. كانت مساهمته التي دامت أكثر من غيرها، بشكلٍ ملائم، هي إحدى الصور التي استخدمها في تقديم حجج نظريته الفاشلة. تُظهر الصورة شمبانزي حديث الولادة وآخر بالغ. مندهشًا من: القبو القحفي الكبير، والرأس المنتصب، والوجه الصغير في الشمبانزي اليافع، أعلن نيف أنه «من بين جميع صور الحيوانات التي أعرفها، هذه هي الصورة الأكثر شبهًا بالإنسان».[35] لقد كان يحاول توضيح كيف يظهر جوهر الإنسان في مراحل النُّمو المبكرة. ربما كانت نظريته خاطئة، لكن هذه الصورة كانت مؤثرة للغاية، إلى درجة أنها استمرت في تحفيز الأبحاث لعقود بعد نشرها لأول مرة في عام 1926.

---

(35) أثارت الصورة الأيقونية التي التقطها نيف نقاشًا كبيرًا على مر السنين. ليس هناك شك في أنه استخدم عينات التحنيط المركبة. انظر حديثًا ريتشارد دوكينز، أعظم عرض على الأرض (New York: Free Press, 2010). وفي حين الوضعيات كانت مصطنعة على الأرجح، فإنَّ التشابه الكمي في نسب قبو الجمجمة والوجه وموضع الثقبة الكبرى بين صغار الشمبانزي والبشر قد أُثبت في المراجع أدناه.



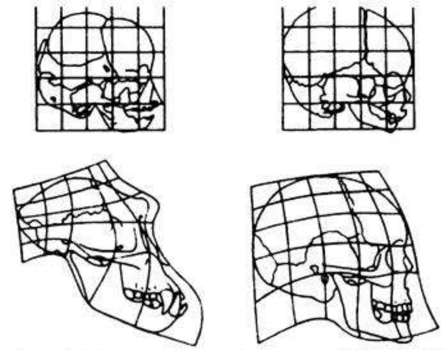
صورة نيف المؤثرة وهي تقارن بين شمبانزي صغير وآخر بالغ. الصغير، وهو على الأرجح عينة محنطة، معروض للتأكيد على أبعاده ووضعيته البشرية.

لدى البشر البالغين عظام حواجب أصغر من الشمبانزي البالغ، وأدمغة أكبر بالنسبة لحجم الجسم، وعظام جمجمة أرق، وفكّان أصغر، ونسب جمجمة مختلفة. ولكن في كل هذه السمات، يشبه البشر الشمبانزي اليافع أكثر مما يشبهون الشمبانزي البالغ. ويبدو أيضًا أن النُّمو قد تباطأ، إذ إن فترة الحمل والطفولة في البشر أطول منها في الشمبانزي. من خلال النُّمو البطيء، يحتفظ البشر بالعديد من النسب والشَّكل الذي كان في صغار أسلافنا، الذين، كما أظهر نيف، كانوا يمتازون بسماتٍ بشرية بارزة في كثير من المناحي.

أصبحت هذه الفكرة عدسة يمكن من خلالها النظر للكثير من التطور البشري. لاحظ عالم الحفريّات ستيفن جاي جولد وعالم الأنثروبولوجيا آشلي مونتاجو في وقتٍ لاحق أن المكونات الأساسية للبشر يمكن أن تظهر ببساطة عن طريق التلاعب بمعدلات النُّمو والتطور: وهي تجمع بين أدمغة كبيرة نسبيًّا بالنسبة إلى حجم الجسم ومرحلة طفولة ممتدة غنية بفرص التعلّم، وقد يصبح الكثير مما يجعلنا متميزين مسألة تتعلق بتعديل توقيت النُّمو. في حين أنَّ هذا التفسير

لتطور الإنسان بسيط وأنيق، فإن المقارنات الجديدة تكشف أن القصة أكثر من مجرد إبطاء عام للنمو. تشبه بعض السمات البشرية تلك الموجودة في صغار الشمبانزي، لكن بعضها الآخر، مثل: شكل الساقين والحوض الذي يمكّن الإنسان من المشي على قدمين، لا يشبهها. إحدى الفرضيات هي أن أجزاء مختلفة من الجسم تتطور من خلال النُّمو بمعدلات مختلفة، تتطور الجمجمة عن طريق إبطاء معدلات نموها، بينما تفعل الأرجل والقدمين العكس.

باستخدام هذه الأفكار وغيرها من علم التَّشريح، افترض دارسي وينتوورث طومسون (1860-1948) نهجًا رياضيًّا لفهم التنوع البيولوجي. كان هدفه هو رد الاختلافات في الشَّكل بين المخلوقات إلى مخططات ومعادلات بسيطة.(36)



تُظهر شبكات الخطوط التي رسمها دارسي طومسون كيف يمكن للتغيرات في النسبة أن تفسر العديد من الاختلافات في شكل الهياكل العظمية، كما في حالة البشر والشمبانزي.

(36) أطلق دارسي وينتوورث طومسون، في كتابه: "حول النُّمو والشَّكل" (New York: Dover, 1992) الذي نُشر في الأصل عام 1917، ثورة في علم الأحياء الكمي. ومن حينها أصبح مجال القياسات المورفومترية، والتحليل الكمي لتغيرات الشَّكل، مجالًا نشطًا للبحث.

كتب كتابه **النُّمو والشَّكل** في أثناء الحرب العالمية الأولى الذي ظهرت بسببه العديد من المهن الأخرى في علم التَّشريح، وقد كانت رسوماته بسيطة بقدر ما كانت مؤثرة. ضع شبكة ديكارتية فوق جمجمة صغير الشمبانزي وطفل الإنسان، بحيث تمر الخطوط عبر نقاط متماثلة في كل منهما. ثم افعل الشيء ذاته مع الجماجم البالغة، بحيث تمر خطوط الشبكة بنفس النقاط التي مرت بها عند الصغار.

والنتيجة هي أن خطوط الشبكة التي كانت منظمة عند الصغار تصبح ملتوية عند البالغين، ويعكس هذا التشوه التغيرات في الشَّكل. يكشف هذا التمثيل أنه في أثناء النُّمو، يبدأ الشمبانزي والإنسان بأبعاد متشابهة نسبيًّا، ولكن بعد ذلك تتقلص جمجمة الشمبانزي في الحجم النسبي، بينما يتوسع الجزء السفلي من الوجه وحواف الحاجب. في البشر، تتوسع الجمجمة، بينما يتوسع الوجه بشكلٍ أقل. من وجهة نظر طومسون، لا تنتج الاختلافات بين البشر والشمبانزي من تكون الأعضاء الجديدة بقدر ما تنتج من التغيرات في نسب الأجزاء المختلفة من الجسم، مثلما يحدث إلى حدٍّ كبير في حالة التغييرات الناتجة عن إبطاء معدلات النُّمو أو تسريعها.

خلية واحدة تحكمها جميعًا:

إنَّ تغيير توقيت الأحداث ما هو إلا طريقة واحدة من بين طرق عدة لإحداث تغييرات تطورية عن طريق تعديل النُّمو الجنيني.

منذ الأيام التي كان فيها باندر يدرس الأجنّة تحت عدسة مكبرة، عرفنا أن نمو أجزاء الجسم المختلفة غالبًا ما يكون مُنسقًا بدرجةٍ عالية. إن أي تغيّر بسيط في عمل خلية واحدة، أو مجموعة منها،

يمكن أن يسبب تغييرات في أجزاء كثيرة من الجسم البالغ. ويمكن رؤية ذلك التأثير حتى في الأسماء التي نطلقها على اعتلالات النُّمو. على سبيل المثال: **متلازمة اليد والقدم والأعضاء التناسلية** Hand-foot-genital syndrome هي طفرة جينية تؤثر في سلوك الخلايا في مرحلة مبكرة من النُّمو. يؤثر هذا التغيير الفردي في حجم الأصابع وشكلها، وتكوين القدمين، والأنابيب التي تحمل البول من الكليتين. ومع مثل هذه التأثيرات واسعة النطاق الناجمة عن تغييرات صغيرة، فإن التغيّر في أنواع الخلايا التي تبني الأجسام قد يحمل أدلة على بعض التغيّرات الثورية التي نشهدها في التاريخ.

لفهم طريقة التطور هذه، يجب علينا العودة إلى بخّاخات البحر. وكما وضّح جارستانج، وكما أكدت أدلة الحمض النووي الحديثة، فإن إحدى الخطوات الحاسمة في التحول من اللافقاريات إلى الفقاريات حدثت عندما حافظت يرقات بخّاخ البحر على سماتها اليرقية لتشكل سلفًا للفقاريات. كان لذلك البالغ الشبيه بالشرغوف البنية الأساسية التي يقوم عليها جسم الفقاريات، ولكن كانت هناك خطوة أخرى في نشوء الفقاريات.[37]

الفقاريات مثل البشر والأسماك ليست ببساطةٍ يرقات بخّاخ

---

(37) أبرز أنصار فكرة استدامة المرحلة اليرقية في البشر paedomorphosis هما أشلي مونتاجو، النُّمو نحو الطفولة (New York: Greenwood Press, 1989)، وستيفن جاي جولد، التطور الجنيني وتطور السلالة (Cambridge, MA: Belknap Press, 1985). وهناك وجهة نظر معارضة لبي تي شيا: "التغاير الزمني في التطور البشري: إعادة النظر في حجة استدامة المرحلة اليرقية"، Yearbook of Physical Anthropology 32 (1989): 69–101. في حين أن بعض السمات تبدو كأنها يرقية، فإنَّ البعض الآخر، مثل المشي على قدمين، لا يبدو كذلك.

البحر. من الهياكل العظمية التي تدعم الجسم إلى الغِمد الميالينيّ الدهني الذي يحيط بالأعصاب، إلى الخلايا الصبغية الموجودة في الجلد، وصولًا إلى الأعصاب التي تتحكم في عضلات الرأس، تتمتع الفقاريات بمئات الميزات التي لا تملكها اللافقاريات.(38) والقائمة بجميع الاختلافات بين اللافقاريات والفقاريات تشمل الأعضاء والأنسجة من الرأس إلى الذيل. ومن الواضح أن أكثر من مجرد التغير في توقيت مراحل النُّمو كان متسببًا في هذا التحول.

نشأت جوليا بارلو بلات (1857–1935) على يد أم ترملت بعد وقت قصير من ولادتها، وكانت معجزةً في علم الأحياء. بعد تخرجها من جامعة فيرمونت في ثلاث سنوات، التحقت بجامعة هارفارد، حيث تعمقت في دراسة أجنّة: الكتاكيت، والبرمائيات، وأسماك القرش. ووفاءً لموهبتها وطموحها، حددت لنفسها هدفًا جريئًا. يمكن القول: إن الرأس هو الجزء الأكثر تعقيدًا في الجسم، دون الأسنان، تحتوي جمجمة الإنسان ثلاثين عظمة تقريبًا، ويوجد أكثر من ذلك العدد في جماجم الأسماك وأسماك القرش. ويأتي التعقيد التَّشريحي للرأس من حقيقة أن تراكيبها تأتيها الإمدادات عن طريق مجموعة متشابكة من: الأعصاب، والشرايين، والأوردة الخاصة التي توجد كلها في إطار صغير نسبيًّا. تتبعت بلات التراكيب البالغة، مثل: الفكين وعظام الوجنة، حتى مراحلها الجنينية المبكرة.

---

(38) نُوقشت أهمية العرف العصبي في النُّمو الجنيني والتطور في:

C. Gans and R. G. Northcutt, "Neural Crest and the Origin of Vertebrates: A New Head," Science 220 (1983): 268–73; and Brian Hall, The Neural Crest in Development and Evolution (Amsterdam: Springer, 1999).

إذ ربما من خلال دراسة كيفية تطور الجماجم، سيمكنها استخلاص أوجه التشابه الأساسية المستترة في الجسم البالغ. وسواء أعرفت ذلك أم لا، فقد كانت على أعتاب أحد أكثر المواضيع إثارة للخلاف في العلم.

لم يكن المناخ الأكاديمي في ذلك الوقت ملائمًا للنساء اللواتي يسعين للحصول على درجات علمية أعلى. وبعد معاناتها في جامعة هارفارد، وجدت بلات ثقافة أكثر انفتاحًا في أوروبا، والتحقت ببرنامج الدِّراسات العليا في ألمانيا. وهكذا بدأت حياة الرحّالَة التي أخذتها عبر أوروبا إلى المختبر البيولوجي البحري في وودز هول، ماساتشوستس. وهناك التقت بلات أو سي ويتمان، مدير المختبر البحري، وتبعته إلى جامعة شيكاغو، حيث أصبح فيما بعد رئيسًا لقسم علم الحيوان.

في مختبر ويتمان الحر، كان التعامل مع العلماء الشباب الطموحين على أنهم زملاء مبتدئون، وكان بإمكانهم مواصلة أبحاثهم الخاصة. في هذا الإطار، نجحت بلات. باستخدام العينات التي جمعتها في وودز هول والتقنيات التي علّمها إياها ويتمان في شيكاغو، نظرت في تكوين الرأس في: السَّمندل، وأسماك القرش، والكتاكيت. كان دافعها تقنيًّا قبل أي شيء آخر، فهذه المخلوقات لها أجنّة كبيرة تتطور داخل بيضة، مما يسهل رؤيتها والتلاعب بها.

وبالتعاون مع ويتمان، طورت طريقة مُجهِدة، ولكنها دقيقة لتتبع الخلايا في أثناء النُّمو. وكانت نقطة بدايتها هي الطبقات الجنينية الثلاث التي اكتشفها باندر وفون باير في عشرينيات القرن التاسع

عشر. في الوقت الذي كانت فيه بلات تؤدي عملها، أصبحت تلك الطبقات الثلاث تعد تقريبًا بمثابة بديهة بيولوجية: تُشكل خلايا الطبقة الداخلية الأحشاء والتراكيب الهضمية المرتبطة بها، وتشكل الطبقة الوسطى: الهيكل العظمي والعضلات، والطبقة الخارجية الجلد والجهاز العصبي. لاحظت بلات أن خلايا الطبقتين الخارجية والوسطى تختلف في الحجم وفي عدد حبيبات الدهون بداخلها. وباستخدام هذا التمييز كواسمة، تتبعت مجموعات صغيرة من الخلايا من كل طبقة لمعرفة إلى أين انتهت في الجمجمة. وقد سمح لها هذا النهج بمعرفة أي تراكيب الرأس جاءت من أي طبقة.

وفق العقيدة السائدة في ذلك الوقت، كان من المفترض أن تأتي جميع عظام جمجمة السَّمندل من الطبقة الوسطى، لكن حبيبات بلات الدهنية أظهرت لها شيئًا آخر تمامًا. بعض عظام الرأس، حتى عاج الأسنان، كانت تأتي من الطبقة الخارجية التي من المفترض أنها تقتصر على تكوين الجلد والأنسجة العصبية. وبالنسبة للبعض، كان هذا الاكتشاف هرطقةً. فاتخذ كبار الباحثين موقف المعارض لها. كتب أحد العلماء البارزين: «إن فحص عدد من التسلسلات والمراحل لم يمكّنني من العثور على أدنى دليل في صالح استنتاجات الآنسة بلات». كان هذا مجرد صوت واحد في جوقة من الانتقادات، التي كانت كفيلة، بالنسبة لباحثة شابة في القرن التاسع عشر، بأن تُنهي مسيرتها المهنية قبل أن تبدأ.

لحُسن حظ بلات، أدرك أنطون دورن (1840–1909)، القائد المؤثر لمحطة علم الحيوان Stazione Zoologica في نابولي، أدرك

أهمية فكرة بحثها. كان في الأصل متشككًا في اكتشافها، لكن تحليلها الدقيق أقنعه باستخدام واسماتها لدراسة تطور أسماك القرش. فكتب: «أنا أتفق تمامًا مع وجهات النظر التي ندين بها للآنسة بلات... وغني عن القول: إنني أيضًا غيرت رأيي، والآن أعارض جميع الأبحاث والملاحظات الموجهة بالنقد ضد النتائج التي توصلت إليها الآنسة بلات».

في زمن بلات، لم يكن هناك مجال كبير للنساء في كليات العلوم، وخاصة اللواتي يطرحن مفاهيم تُعارض المعتقدات التقليدية الراسخة. ولأنها لم تستطع أن تجد عملًا في مجال العلم، انتقلت إلى باسيفيك جروف، كاليفورنيا، لتأسيس مجموعتها البحثية الصغيرة. ومع استمرارها في تحقيق الاكتشافات، كتبت إلى ديفيد ستار جوردان، رئيس جامعة ستانفورد المنشأة حديثًا. وفي محاولة يائسة للحصول على وظيفة في مجال العلوم، ومع علمها بأنها حققت إنجازات كبيرة، أنهت رسالتها قائلة: «بدون عمل، الحياة لا تستحق أن تُعاش. إذا لم أتمكن من الحصول على العمل الذي أرغب فيه، سآخذ البديل الأفضل بالنسبة إلي».

تركت بلات المجال بعدما بقيت عاطلة عن العمل وشاعرة بأنها لن تحصل على عمل في مجال العلوم، لكنها أخذت إرادتها القوية واستقلالها الشرس إلى تحديات جديدة. وفي فترة قصيرة، انتُخبت أول عمدة أنثى لمدينة باسيفيك جروف، حيث قادت الجهود لإنشاء حَرَم لإنقاذ خليج مونتيري من طغيان العمران. ويمكن للمقيمين والزوار

في مونتيري اليوم أن يشعروا بتأثير جوليا بارلو بلات.[39]

توفيت بلات في عام 1935 ولم تعش لتشهد إثبات أنها كانت على صواب بعد ما يقارب من ثلاثة وأربعين عامًا من بحثها الأول حول هذا الموضوع. سيرًا على خطاها، طور الباحثون أساليب محسنة لوسم الخلايا في أثناء نموها، فحقنوا الأصباغ في خلايا الأجنّة، وتتبعوا إلى أين انتهت في مراحل لاحقة. وفي تقنيةٍ أخرى، أخذ الباحثون مجموعات من الخلايا من طائر السمان، وزرعوها في جنين دجاج في مراحل مختلفة من النِّمو. وبما أنه يمكن تمييز خلايا السمان بسهولة عن خلايا الكتاكيت، فقد تمكن العلماء من معرفة الأعضاء التي نتجت منها، وقد أكدت كل من التقنيتين أن تراكيب الرأس التي درسها بلات لم تأتي من طبقة فون باير الوسطى. تبدأ الخلايا في الحبل الشوكي النامي وتهاجر إلى الخياشيم لتكوين عظام الخياشيم.



جوليا بلات بعد فترة عملها عمدةً لمدينة باسيفيك جروف، كاليفورنيا

---

(39) أعمال جوليا بلات وحياتها مذكورة في:

S. J. Zottoli and E. Seyfarth, "Julia B. Platt (1857–1935): Pioneer Comparative Embryologist and Neuroscientist," Brain, Behavior and Evolution 43 (1994): 92–106

إنَّ اكتشاف أنَّ الخلايا تهاجر بين الطبقات ليس مجرد ملاحظة غريبة لتنظيم الخلايا في الجنين ذي الطبقات الثلاث، بل إنَّ له آثارًا أعمق على فهمنا لكيفية نشوء التراكيب الجديدة. تنفصل هذه الخلايا عن الحبل الشوكي النامي لتنتقل إلى أنحاء جسم الجنين. وبمجرد وصولها إلى مواضعها الجديدة، تُنتج الأنسجة. وتتحول إلى خلايا صبغية، وإلى الغِمد الميالينيّ للأعصاب، وعظام الرأس، من بين أشياء أخرى كثيرة - وكلها سمات تنفرد بها الفقاريات. يمكن تتبع التغير الكبير في تحول أسلاف جارستانج إلى حيوانات فقارية الذي يتضمن تكون أنسجة جديدة في أنحاء الجسم، إلى ظهور نوعٍ واحد من الخلايا، نوع جديد مشتق من الطبقة الخارجية التي وصفها فون باير وباندر. كانت بلات على حق من مناحٍ لم تكن لتتصورها قط. فالخلايا التي تعرفت عليها كانت بمثابة سلائف لجميع الأنسجة التي تجعل الفقاريات مميزة.

كان جارستانج قد وضّح أن الخطوة الأولى في أصل المخلوقات ذات العمود الفقري جاءت من تغير في توقيت النُّمو، مع الإبقاء على سمات يرقات بخّاخ البحر في نسلٍ من البالغين. ساعد اكتشاف بلات في الكشف عن التحول التالي، وهو نشوء نوع جديد من الخلايا. في الحالتين، يمكن تلخيص التغيرات المعقدة في الأعضاء والأنسجة المختلفة في تغيرات أبسط مرتبطة بالنُّمو. يمكن أن يؤدي تغيير التوقيت في إحدى الخطوات ونشوء نوع جديد من الخلايا في خطوة أخرى إلى إنتاج تكوين جسمي جديد.

وبالطبع تثير هذه الملاحظات تساؤلات مثل: كيف تحدث

التغيرات في النُّمو؟ ما أنواع التحولات البيولوجية التي يمكن أن تسبب تطور النُّمو الجنيني نفسه؟

لا ترث الكائنات الحية جماجم أو أعمدة فقرية أو طبقات خلايا من أسلافها، بل ترث العمليات اللازمة لبنائها. ومثل الوصفة العائلية التي تنتقل من جيل إلى جيل ويعدلها كل جيل، فإن المعلومات التي تبني الأجسام تتغير باستمرار على مدى ملايين السنين عندما ينقلها الأسلاف إلى نسلهم. وعلى عكس الوصفة المستخدمة في المطبخ، فإن الوصفة التي تبني الأجسام من جديد في كل جيل لا تُكتب بالكلمات بل بالحمض النووي. ولفهم الوصفات البيولوجية، إذًا، نحتاج إلى تعلم قراءة لغة جديدة تمامًا ورؤية أنواع جديدة من الأسلاف في تاريخ الحياة.

الفصل الثالث

المايسترو في الجينوم

«**لقد اكتشفنا** سر الحياة»، بهذا التفاخر المشكوك في صحته، أدخل فرانسيس كريك (1916-2004) جيمس واتسون إلى حانة إيجل في كامبريدج، وأدخل بقيتنا إلى عصر الحمض النووي. وبعد عام واحد، في عام 1953، جاء الإعلان العلمي عن الاكتشاف بلهجة مختلفة تمامًا.

في صفحات مجلة نيتشر Nature المرموقة، افتتح واتسون وكريك مقالتهما بتصريح مُتحفظ جاف على الطريقة البريطانية قلده الآخرون في السنوات التالية. قالا: إن اكتشافهما «يحمل سمات جديدة ذات أهمية بيولوجية معتبرة».[40]

---

(40) الاقتباس المشكوك في صحته موجود في كتاب جي دي واتسون، الحلزون المزدوج (New York: Touchstone, 2001). ظهر اقتباس واتسون وكريك الكامل في ورقة بحثية من صفحتين أعلنا فيها نتائجهما للعلم: "نود أن نقترح بنية لملح الحمض النووي منقوص الأوكسجين (DNA). إن لهذا التركيب سمات جديدة ذات أهمية بيولوجية معتبرة". جي دي واتسون وإف. كريك، "بنية للحمض النووي منقوص الأوكسجين".
J. D. Watson and F. Crick, "A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid," Nature 171 (1953): 737–38.

أذِن كل من الإعلانين بشيءٍ أصبحت الأجيال اللاحقة تعدّه من البدهيات، فقد وضع الثنائي نموذجًا لبنية الحمض النووي، يوضح أنه يوجد كشرائط مزدوجة يمكنها، عند فصلها، أمّا أن تصنع بروتينات أو أن تصنع نسخًا من نفسها. باستخدام هذه الحيلة، يمكن للجزيء أن يفعل شيئين رائعين:

أولًا: حمل معلومات تصنيع البروتينات التي تبني الأجسام.

ثانيًا: تمرير تلك المعلومات إلى الجيل التالي.

وجد واتسون وكريك، بعد عمل روزاليند فرانكلين وموريس ويلكنز، أن شريط الحمض النووي الفردي يتألف من تسلسلات من جزيئات أخرى، مرصوصة مثل الخرز على خيط. يمكن أن تكون هذه الجزيئات، المعروفة باسم القواعد، واحدة من أربعة أنواع، تُمنح عادةً الرموز: A، وT، وG، وC.[41] يمكن أن يحتوي شريط الحمض النووي الواحد سلسلة من مليارات القواعد التي تشكل سلاسل، مثل: AATGCCCTC أو أي مجموعة من الأحرف الأربعة.

إنها فكرة تبعث على التواضع: إن الجزء الأكبر من هويتنا يكمن في ترتيب الجزيئات في سلسلة كيميائية. إذا تأملت الحمض النووي كجزيء يحتوي معلومات، فالأمر أشبه بما لو أن لدينا الملايين من أجهزة الحاسوب الخارقة في كل خلية. يتألف الحمض النووي البشري من سلسلة مؤلفة من 32 مليار قاعدة تقريبًا. هذا الشريط

---

(41)ACGT هو اختصار للأنواع الأربعة من القواعد الموجودة في جزيء الحمض النووي: الأدينين (A)، والسيتوزين (C)، والجوانين (G)، والثايمين (T).

مقسم إلى كروموسومات، ومطوي، وملفوف لتَسَعه نواة كل خلية. إن حمضنا النووي مرصوص بإحكام لدرجة أنه إذا جرى فكُّه وربط أطرافه ومدّه، فإن طول كل شريط سيكون حوالي ستة أقدام. تحتوي كل خلية من تريليونات الخلايا في أجسامنا جزيئًا مطويًّا بإحكام طوله ستة أقدام ملفوف إلى عُشر حجم أصغر حبة رمل. إذا حلَلْتَ الحمض النووي الموجود في كل خلية من الأربعة تريليونات خلية الموجودة في جسمك ووصلته طرفًا لطرف، فإنَّ شريط الحمض النووي فيك سيمتد تقريبًا إلى بلوتو.

عندما يتحد الحيوان المنوي والبويضة في أثناء الحمل، يصبح في البويضة المُخصَّبة حمض نووي من كل من الوالدين، وبالتالي، تتدفق المعلومات الوراثية من جيلٍ إلى جيل.

يشتمل الحمض النووي الخاص بنا على مساهمات من آبائنا البيولوجيين، والحمض النووي لآبائنا من آبائهم البيولوجيين، وهكذا دواليك، غوصًا عميقًا في الماضي. يشكل الحمض النووي نَسَبًا غير منقطع بين الكائنات الحية عبر الزمن، ويمكن الاستعانة بإحدى رؤى داروين العظيمة لترجمة هذه الفكرة البسيطة عن نسب العائلة إلى التاريخ الأوسع. والنتيجة الجزيئية لفكرته هي أنه إذا كنا نتشارك سلفًا واحدًا مع الأنواع الأخرى، فيجب أن يكون هناك تدفق متصل للحمض النووي منهم إلينا، فكما ينتقل الحمض النووي فينا من جيلٍ إلى جيل، ومن الآباء إلى الأبناء، كذلك ينبغي أن ينتقل من الأنواع السلفيّة إلى الأنواع المتحدرة على مدى تاريخ الحياة الذي يمتد لأربعة مليارات عام. وإذا كان هذا صحيحًا، فإن

الحمض النووي عبارة عن مكتبة تكمن في كل خلية من كل كائن على هذا الكوكب. محفوظ في ترتيب تلك القواعد الأربع ATGC سجلٌ للمليارات السنين من التغيرات في العالم الحي. والفكرة كانت أن نتعلم كيف نقرأه.[42]

محاطًا بأقارب مؤثرين من بينهم: علماء التَّشريح، والفلاسفة، والفنانون، والجراحون المشهورون، وُلِد إميل زوكركاندل (1922-2013) في فيينا وسط عالم من: الأفكار، والعلوم، والفنون. ومع وصول النازيين إلى السلطة في ألمانيا، لجأت عائلته إلى باريس والجزائر. وصل أصدقاء العائلة بين زوكركاندل وألبرت آينشتاين، الذي حصل، باستخدام نفوذه، على تصريح للشاب إميل ليدرس في الولايات المتحدة. أخذت هذه النقلة زوكركاندل إلى جامعة إلينوي والمختبرات التي تدرس بيولوجيا البروتينات هناك. ولأنه كان مهتمًّا بالمحيطات، فقد انجذب إلى المحطات البحرية في الولايات المتحدة وفرنسا خلال فصل الصيف. وهناك أصبح مفتونًا بالسلطعونات والجزيئات المسؤولة في أثناء نموها وانسلاخها من أجنّة صغيرة إلى حيوانات بالغة كاملة النُّمو.

دخل زوكركاندل مجال الكيمياء الحيوية في وقتٍ مواتٍ. ففي

---

(42) قصة الكشف عن عمل الحمض النووي والطرق التي تُصنَّع بها البروتينات موجودة في كتاب ماثيو كوب، أعظم أسرار الحياة: السباق لحل الشيفرة الوراثية. (New York: Basic Books, 2015)انظر أيضًا كتاب هوراس فريلاند جودسون الكلاسيكي، اليوم الثامن من الخلق: صناع الثورة في الأحياء (New York: Simon and Schuster, 1979).

أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، بدأ العلماء في المعاهد الوطنية للصحة، وحتى فرانسيس كريك نفسه، في تفسير ما تعنيه سلاسل الحروف ATGC. يحمل كل تسلسل في الحمض النووي التعليمات اللازمة لتكوين تسلسل آخر من الجزيئات. واعتمادًا على الظروف، يمكن استخدام تسلسل الحمض النووي كقالب لصنع البروتين أو يمكنه عمل نسخ من نفسه. لبناء البروتين، تُترجم سلاسل القواعد ATGC إلى سلسلة من نوع آخر من الجزيئات: الأحماض الأمينية. والسلاسل المختلفة من الأحماض الأمينية تُنتج بدورها بروتينات مختلفة. هناك عشرون نوعًا مختلفًا من الأحماض الأمينية، ويمكن لأي حمض منها أن يوجد في أي نقطة في التسلسل، كما يمكن لهذه الشيفرة إنتاج عددٍ هائل من البروتينات المختلفة. ببعض الرياضيات البسيطة: إذا كان هناك عشرون حمضًا أمينيًّا مختلفًا يمكن تجميعها في أي ترتيب، وكانت سلسلة البروتين مُؤلَّفة من قرابة مائة حمض أميني، فإن عدد البروتينات المختلفة التي يمكن تصنيعها هو 1 وأمامه 130 صفرًا. والرقم الحقيقي أعلى بكثير؛ لأن طول البروتين في تقديرنا، وهو مائة حمض أميني، صغير نسبيًّا. أكبر بروتين في جسم الإنسان، المعروف باسم التَيتين titin، يتألف من سلسلة من 34350 حمضًا أمينيًّا.

والفكرة هي أن نتذكر أن الحمض النووي يتألف من سلسلة من القواعد التي يُرمز لها بأحرف، والتي تحمل شيفرة سلاسل الأحماض الأمينية التي بدورها تشكل البروتينات؛ ونظرًا لأنَّ البروتينات المختلفة تتألف من تسلسلات مختلفة من الأحماض الأمينية، فإن

تسلسل الحمض النووي يحمل شيفرة البروتينات المتنوعة التي تساعد في تجديد الحياة في كل جيل.

وبحلول أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، تمكن الباحثون من رسم خريطة لتسلسلات الأحماض الأمينية في البروتينات المختلفة؛ بهدف فهم كيفية عملها في الجسم. بشّرت هذه الاكتشافات بعصر يستطيع فيه العلماء دراسة بنية البروتين لفهم الأمراض. على سبيل المثال: في فقر الدم المنجلي، تعيش خلايا الدم الحمراء المريضة من عشرة إلى عشرين يومًا فقط، في حين يمكن أن تعيش خلايا الدم الحمراء السليمة عشرة أضعاف تلك المدة تقريبًا. علاوة على ذلك، فإن الخلايا المنجلية، كما يوحي الاسم، لها شكل مميز. يؤدي هذا الاختلاف إلى تدميرها في الطحال بسهولة أكبر بكثيرٍ من خلايا الدم الحمراء الطبيعية التي تشبه القرص. ونتيجة ذلك، يمكن أن يكون فقر الدم المنجلي، في حالاته القصوى، مميتًا بداية من سن الثالثة لدى ما يقارب من 70٪ من المصابين. وما الفرق بين بروتين خلايا الدم الحمراء السليمة وبروتين الخلايا المنجلية؟ إنه حمض أميني واحد فقط في السلسلة: يُستبدل الحمض الأميني الجلوتاميت بحمضٍ يُسمى: «الفالين» في الموضع السادس في التسلسل. يمكن أن ينتج عن الاختلاف الطفيف في تسلسل الأحماض الأمينية تداعيات هائلة على البروتين، والخلايا التي يوجد فيها البروتين، وحياة الأفراد الذين توجد فيهم تلك الخلايا.

مستلهمًا قوة هذه البيولوجيا الجديدة حول زوكركاندل انتباهه إلى أنواع الحيوانات الموجودة في مختبره البحري. وافترض بأنه عندما

ينتقل السلطعون من جنين صغير إلى حيوان بالغ مكتمل النُّمو، فإن بروتينات محددة تكون مسؤولة عن ذلك. فعمد إلى النظر في هياكل البروتينات وكيفية التحكم في تنفس السلطعون ونموه وانسلاخ قشوره.

ثم تغيرت حياته بشكلٍ من أشكال النصيب العلمي.

كان لينوس بولينج (1901-1994)، الحائز جائزة نوبل في الكيمياء آنذاك، يزور فرنسا ومرّ بالمختبر البحري لرؤية بعض الأصدقاء. سعى زوكركاندل، بحبه للبروتينات والسلطعونات، إلى الوصول لبولينج، مثلما يحاول المعجب الوصول إلى نجم الروك أكثر مما يحاول العالم الوصول إلى مشروع بحثي جديد. غيّر ذلك اللقاء زوكركاندل، وفي النهاية، أحدثَ تغييرًا على مستوى العلم نفسه.

بحلول منتصف الخمسينيات من القرن الماضي، اكتشف بولينج بنية البلورات والخصائص الأساسية للذرات والروابط الجزيئية، حتى أنه صاغ نظرية جزيئية للتخدير العام، لكنه خسر السباق مع واتسون وكريك للكشف عن بنية الحمض النووي في النهاية. وبعد ذلك، بذل جهدًا كبيرًا في الترويج لنظريته بأن فيتامين سي يقي من نزلات البرد والالتهابات الأخرى.

نشأ بولينج في ولاية أوريجون، والتحق بكلية الزراعة في جامعة ولاية أوريجون. وقد جعله أسلوبه الشجاع في العلوم بطلًا بالنسبة لي. أنا عضو في لجنة الاختيارات ضمن مؤسسة في نيويورك تمول الفنانين والعلماء في اللحظات الحاسمة من حياتهم المهنية. كانت المؤسسة تهب المنح منذ عشرينيات القرن الماضي، كما احتفظت بكل

الطلبات التي تلقتها جميعًا. ومكاتبها في بارك أفينيو بمثابة كنز دفين من الرسائل والملفات واستمارات التقديم لـ: حائزين جوائز نوبل، وروائيين، وراقصين، وأكاديميين من جميع المشارب. كان أحد الزملاء هناك على علم باهتمامي بالموضوع، وعندما حضرت إلى العمل في صباح أحد الأيام، رأيت ملفًا قديمًا مجعدًا ينتظر على مكتبي. مكتبة سُر مَن قرأ

كانت استمارة تقديم بولينج من عشرينيات القرن الماضي. في ذلك الوقت، كانت طلبات التقديم تحتاج إرفاق الشهادات الجامعية وملاحظات الأساتذة، وهي أشياء لا نطلبها اليوم مطلقًا.

لفت انتباهي بشكلٍ خاص تقديراته في جامعة ولاية أوريجون. تميز سجله بالتقديرات المرتفعة والأخرى المنخفضة. كما هو متوقع، حصل على علامات A دائمًا في: الهندسة، والكيمياء، والرياضيات. أمّا ما كتبه في «فن الطبخ في المعسكرات»، فمنحه علامة C غير مميزة. أمّا الألعاب الرياضية، فكانت لسنوات عبارة عن سلسلة مستمرة من علامات F. في سنته الثانية، حصل بولينج على إحدى أعلى الدرجات في فصله في منهج إلزامي عن «المتفجرات». وفي النهاية، فاز بجائزتي نوبل بعد حصوله على جائزة الكيمياء عام 1954 لفهمه بنية البروتينات، وفاز بجائزة السلام عام 1962، لإسهاماته ضد التجارب النووية.

كانت علامات بولينج المتفوقة في الكيمياء والمتفجرات في الكلية فاتحة خير لحياته المستقبلية.

بعد محادثة قصيرة، رأى بولينج شيئًا مميزًا في زوكر كاندل، ودعاه

إلى الانتقال إلى معهد كاليفورنيا التقنيّ Caltech. لكن عرض بولينج جاء مقيدًا، ولم يكن لدى بولينج مختبر يخصه في ذلك الوقت؛ لأنه كان بعيدًا معظم الأيام يعمل على أنشطته المضادة للأسلحة النووية. وضع بولينج زوكركاندل مع زميل له، كان مختبره مجهزًا لإجراء تجارب الكيمياء الحيوية. وعندما طرح زوكركاندل فكرته حول العمل على بروتينات السلطعون، استبعد بولينج هذا الطموح. لأكثر من عقد، كان بولينج مهتمًّا بفهم تأثير الإشعاع النووي في الخلايا، وكان أحد أهداف تلك الدراسة هو بروتين الهيموغلوبين الذي ينقل الأوكسجين في الدم من الرئتين إلى خلايا الجسم.

اقترح بولينج، وهذا تلطيف للعبارة، أن يتخلى الشاب زوكركاندل عن طموحه في فهم السرطانات، وأن يقضي وقته، عوضًا عن ذلك، في التفكير في الهيموغلوبين. صحيح أنَّ هذا التحول قد أخرج خطط زوكركاندل عن مسارها، إلا إن النصيحة كانت بعيدة النظر.

استكشف زوكركاندل بروتينات الهيموغلوبين من أنواع مختلفة باستخدام بعض تقنيات العصر التي كانت محدودة للغاية، ولم يتمكن من سَلْسَلة تركيب الأحماض الأمينية في بروتينات الأنواع المختلفة، لذلك استخرجها واستخدم طرقًا بسيطة نسبيًّا لتقييم حجمها الإجمالي وشحنتها الكهربائية. وبالافتراض الآمن بأن البروتينات التي تحتوي تسلسلات أحماض أمينية متشابهة بشكلٍ عام يُفترض أن تكون ذات أوزان وشحنات كهربائية متماثلة، فقد

استخدم هذه القياسات التي يمكن الحصول عليها بسهولة كبدائل تدل على تشابهها بشكل عام.

وجد زوكركاندل أن الهيموغلوبين البشري وهيموغلوبين القردة أكثر شبهًا ببعضهما من حيث الحجم والشحنة مقارنة بهيموغلوبين الضفادع والأسماك.

كان هذا القياس البسيط بالنسبة له بمثابة بارقة على شيء مهم، وتكهن بأن هذا التشابه بين بروتينات الإنسان والقردة يمكن أن يكون نتيجة التطور: السبب في تشابه بروتينات الدم لدى الإنسان والرئيسات هو قرابتهما الوثيقة، وعندما عرض نتائجه الأولية على رئيس المختبر، قوبل ببرود. كان البروفسور من المؤمنين المتحمسين بنظرية الخلق، ولم يكن يسمح بأي حديث عن التطور في مختبره. كان زوكركاندل مُرحَّبًا به ليعمل هناك، لكن الرئيس لن تكون له أي علاقة بأي أوراق منشورة تشير إلى أن ثمة علاقة بين البشر والقرود. بدا أنَّ الباب قد أُغلق في وجه زوكركاندل في اللحظة التي رأى فيها بريقًا من النجاح.

ثم ضرب الحظ ضربته، تلقى بولينج دعوة للمساهمة ببحث في الفيستشرفت Festschrift لعالمٍ آخر فائز بجائزة نوبل، وهو صديقه المقرب ألبرت سينت جيورجي. الفيستشرفت هي كتب أو أعداد خاصة من المجلات توضع تكريمًا لتقاعد زميل مهم. وهي تحتوي عادةً أوراقًا تحتفي بحياة مهنية كُرست للعلم يُسهم فيها الأصدقاء والزملاء القدامى. الفكرة الأساسية هي أنه لا يوجد أي شيء مهم تقريبًا يظهر في تلك المجلدات؛ لأن الأوراق العلمية عادة ما تكون

عبارة عن ذكريات بها شذرات متفرقة من البيانات الجديدة. لا تخضع هذه المجلدات غالبًا لمراجعة الأقران، ومن ثم يمكنها أن تشمل صفحات طويلة من الإطراء على صاحب التكريم أو من البيانات التي لا يستطيع المؤلفون نشرها في أي مكانٍ آخر. مدركًا لهذه الحقائق، وراغبًا في تكريم صديقه الذي كان هو نفسه عالمًا جريئًا للغاية، خطرت لبولينج فكرة، فأخبر زوكركاندل بفكرة كتابة «شيء صادم».

كان هذا الطموح الغريب بمثابة الوقود الدافع لواحدة من الأوراق العلمية الكلاسيكية في القرن العشرين.[43]

كان التوقيت مناسبًا للقيام بكشف جريء في الكيمياء الحيوية، وبحلول الوقت الذي دخل فيه زوكركاندل في زمرة بولينج في أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، أصبحت تسلسلات الأحماض الأمينية في البروتينات المختلفة متاحة، وكان مختبر بولينج يستطيع الوصول إلى تلك البيانات.

كانت سَلسلة الحمض النووي المتاحة اليوم لا تزال بعيدة المنال، أمّا سَلسلة الأحماض الأمينية في البروتينات المختلفة فقد كانت ممكنةً، وإن كانت صعبةً وبطيئةً.

(43) أطلق زوكيركاندل وبولينج نهجهما الجديد في سلسلة من الأوراق البحثية في منتصف الستينيات، وتشمل أهمها:

E. Zuckerkandl and L. Pauling, "Molecules as Documents of Evolutionary History," Journal of Theoretical Biology 8 (1965): 357–66; and E. Zuckerkandl and L. Pauling, "Evolutionary Divergence and Convergence in Proteins," 97– 166, in V. Bryson and H. J. Vogel, eds., Evolving Genes and Proteins (New York: Academic Press, 1965)

كان بولينج يسعى إلى الحصول على تسلسلات البروتينات من: الغوريلا، والشمبانزي، والإنسان، وكائنات أخرى.

وبفضل هذه المعلومات الجديدة، كان زوكركاندل وبولينج على استعداد لمواجهة السؤال الأساسي: ماذا تخبرنا بروتينات الحيوانات المختلفة عن العلاقات فيما بينها؟ أشارت النتائج الأولية التي توصل إليها زوكركاندل باستخدام التحليل الأولي لحجمها وشحنتها، أشارت ضمنًا إلى أن البروتينات قد تخبرنا الكثير عن التاريخ.

قبل قرن وقبل أن يعرف أحد شيئًا عن الحمض النووي وتسلسل البروتينات، توصلت أفكار داروين إلى استنتاجات محددة بشأنها. توقع داروين أنه إذا كانت المخلوقات تشترك في شجرة نسب واحدة، فإن تسلسل الأحماض الأمينية في بروتينات: البشر، والرئيسيات الأخرى، والثدييات، والضفادع يجب أن يعكس تاريخها التطوري.

أشارت تجارب زوكركاندل الأولية إلى أن الحال قد تكون كذلك بالفعل.

تبين أن الهيموغلوبين هو الهدف المثالي لهذا البحث.

تستخدم جميع الحيوانات الأوكسجين في عملية الأيض، والهيموغلوبين هو بروتين الدم الذي يحمل الأوكسجين من أعضاء الجهاز التنفسية، سواء أكان الرئات أم الخياشيم، إلى أعضاء الجسم الأخرى.

قارن زوكركاندل وبولينج تسلسل الأحماض الأمينية في جزيء الهيموغلوبين في الأنواع المختلفة، وتمكنا من تقدير مدى تشابه

البروتينات.

كل نوع جديد أضافه زوكركاندل وبولينج إلى تحليلهما وضع تنبؤات داروين موضع تركيز أكثر وضوحًا.

كانت تسلسلات البشر والشمبانزي أشبه ببعضها من تسلسلات الأبقار، وكانت كل هذه الأنواع من الهيموغلوبين في الثدييات أشبه بعضها من الموجودة في الضفادع.

أكد زوكركاندل وبولينج أنهما يستطيعان فك رموز العلاقات بين الأنواع، وتاريخ الحياة بشكل عام، من خلال البروتينات.

حمل الثنائي فكرتهما إلى مناحٍ أخرى في تجربة فكرية جريئة. وتساءلا: ماذا لو تطورت البروتينات بمعدلات ثابتة على مدى فترات طويلة من الزمن؟ إذا كان ذلك صحيحًا، فمعناه أنه كلما زاد الاختلاف بين بروتينات نوعين، زاد الوقت الذي تطورت فيه هذه الأنواع بشكل مستقل عن سلف مشترك. وبهذا المنطق، فإن السبب وراء تشابه بروتينات البشر والقردة مع بعضها أكثر من بروتينات الضفادع هو أن البشر والقردة يتشاركون في سلف واحد أحدث مما يتشاركه أي منهما مع الضفادع. وهذا أمر منطقي بالنظر إلى ما نعرفه من علم الحفريّات - فالسلف المشترك للبشر والقردة من الرئيسيات سيكون أحدث من السلف البرمائي الذي يتشاركونه مع الضفادع.

وإذا كانت البروتينات تتطور بمعدل ثابت، كما توقع بولينج وزوكركاندل، فيمكنك استخدام الاختلافات في تسلسل البروتينات للتوصل للوقت الذي تقاسمت فيه هذه الأنواع ذلك السلف المشترك. (انظر آخر هذا الفصل لمزيد من القراءة ومناقشة

الكيفية). يمكن للبروتينات الموجودة في أجسام الأنواع المختلفة أن تكون بمثابة الساعة لفهم التطور: لن تكون هناك حاجة إلى صخور أو حفريّات لمعرفة التوقيت في تاريخ الحياة. هذه الفكرة، التي كانت صادمة للغاية عندما اقتُرحت أول مرة، تُعرف الآن باسم: «الساعة الجزيئية» وتستخدم في كثيرٍ من الحالات لحسابِ مدى قِدم الأنواع المختلفة.

كان زوكركاندل وبولينج يبتكران طريقة جديدة تمامًا لاستنتاج تاريخ الحياة. لأكثر من قرن من الزمان، كانت رموز تاريخ الحياة تُفك من خلال مقارنة الحفريّات القديمة. ولكن الآن، ومن خلال معرفة بنية البروتينات في الحيوانات المختلفة، تمكن بولينج وزوكركاندل من تقييم العلاقات التطورية. بشّرت هذه الرؤية بثروة كبيرة، فالأجسام تحتوي عشرات الآلاف من البروتينات، ويمكن أن تكون بروتينات الأنواع المختلفة حافلة بالمعلومات، مثل: الحفريّات. لكن هذه الحفريّات ليست في الصخور، بل تكمن داخل كل عضو ونسيج وخلية في كل أجسام الحيوانات الحية على هذا الكوكب. إذا كنت تعرف كيف تبحث، فيمكنك اكتشاف تاريخ الحياة في أي حديقة حيوانات أو حوض أسماك يحتوي عددًا كافيًا من الحيوانات.

لقد أصبح تاريخ جميع المخلوقات معروفًا الآن، حتى تلك التي لَّما يُكتشف السجل الحفريّ لها بعد.

ينتقل الحمض النووي من جيلٍ إلى جيل، ويحتوي المعلومات اللازمة لتكوين البروتينات، وبالتالي، تكوين الأجسام. قد يأتي

الأفراد وأجسامهم ويذهبون، لكن الجزيئات تشكل آصِرة غير منقطعة عبر العصور. وكلما بحثنا أكثر في هذه الرابطة، تعلمنا المزيد عن العلاقات بين جميع الكائنات الحية.

وبنشر الفيستشرفت في أوائل الستينيات من القرن الماضي، أقام زوكركاندل وبولينج مجالًا جديدًا في البحث العلمي يعتمد على استخدام الجزيئات لتقفّي التاريخ. لكن لم يكن باستطاعة المرء رؤية التأثير المستقبلي لبحثهما بالحكم من رد فعل المجتمع العلمي في ذلك الوقت. «لقد كرهه علماء التصنيف. واعتقد علماء الكيمياء الحيوية أنه عديم الفائدة». يتذكر زوكركاندل في الذكرى السنوية الخمسين لتأسيسه. كل من كان يركز على الجانب التَّشريحي، مثل: علماء التصنيف وعلماء الحفريّات، كان يحتقر هذه الفكرة. فلن يعود لتلك المجالات حق احتكار إعادة بناء التاريخ التطوري. أظهر زوكركاندل وبولينج أن كل جزيء تقريبًا في أجسام الكائنات الحية يمكنه أن يخبرنا عن أحداث الماضي. وإذا كان علماء الحفريّات قد اعتقدوا أن البحث يهدد وجودهم، فإن علماء الكيمياء الحيوية لم يهتموا به كثيرًا. لقد كانت الدِّراسات التطورية بالنسبة لهم بمثابة مجال هادئ راكد. ومن وجهة نظرهم، يعمل العلماء الحقيقيون على دراسة: بنية البروتين، والأمراض، والوظائف، وليس على العلاقات بين البشر والضفادع.

ثورة جزيئية:

تتشابه التفاعلات الكيميائية والأفكار العلمية في أمر أساسي، فكلاهما يحتاج عادةً إلى حافز لتحريكه، وقد أخذ أحد الرجال أفكار

زوكركاندل وبولينج، وأنتج منها مجتمعًا من العلماء الذين تناولوا تاريخ الحياة بعيون جديدة.

في أوائل الستينيات، تحوّل ألان ويلسون (1934-1991)، وهو معجزة في الرياضيات من نيوزيلندا إلى دراسة علم الأحياء، وانضم إلى كلية الكيمياء الحيوية في جامعة كاليفورنيا في بيركلي. في ذلك الوقت كانت الاضطرابات تعم الجامعات بشكل عام، وفي بيركلي على وجه الخصوص، وأصبح ويلسون واحدًا من الأساتذة أصحاب النشاط السياسي الأكبر هناك. كان يستمتع بإثارة الاضطراب في كل ما يفعله، إلى درجة أن طلابه وصفوا الاحتجاجات السياسية بأنها نوع من لقاءات المختبر الجماعية.

حكمت فرضية بسيطة مسيرة ويلسون المهنية حتى وفاته المبكرة في عمر السادسة والخمسين، كان يعتقد أنه إذا لم يتمكن المرء من تبسيط ظاهرة معقدة إلى الأجزاء المكونة لها، فمعنى ذلك أنه لا يفهمها. وقاده عالِم الرياضيات الكامن بداخله إلى البحث عن قواعد بسيطة وراء الأنماط البيولوجية، ومن ثم تطوير وسائل صارمة لاختبارها. كان ويلسون شغوفًا بتطوير فرضيات جريئة وبسيطة للغاية لشرح الأنماط المعقدة في تاريخ الحياة. وبعدها يحاول دحض فكرته بأكبر قدرٍ ممكن من الأبحاث. وإذا صمدت الفكرة في وجه وابل البيانات، تصبح جاهزة ليكشف عنها للعالم الخارجي. وقد جعل هذا النهج مختبر ويلسون مركزًا صاخبًا لبعض أفضل وألمع العلماء في بيركلي في السبعينيات والثمانينيات، وأصبح مختبره صوبة فكرية ذات توجهات حرة وقوية، تجتذب الطلاب الشباب

الموهوبين من أنحاء العالم، وقد برز العديد منهم لاحقًا كأعلام قادة في مجالاتهم.

وصلتُ إلى بيركلي بعد حصولي حديثًا على درجة الدكتوراه في علم الحفريّات، في عام 1987، عندما كان ويلسون وفريقه في ذروة اكتشافاتهم. كانت أفكاري تتمحور حول الصخور والحفريّات، وليس حول البروتينات والحمض النووي. وكانت محاضرات ويلسون تجتذب بالفعل حشودًا كبيرة من أنحاء الجامعة، وكانت جبهات المعركة بين علماء التَّشريح وعلماء الأحياء الجزيئية واضحة ومستحكمة بعمق. في إحدى الندوات، كنت جالسًا مع عدد من علماء الحفريّات الذين كان تبرّمهم يزداد مع كل شريحة يعرضها ويلسون في أثناء حديثه، ثم جاءت الذروة عندما عرض ويلسون معادلة بسيطة ذات ثلاثة متغيرات، ادَّعى أنَّها تكشف مدى سرعة حدوث التطور في الأنواع المختلفة. عند رؤية تلك الشريحة، نكزني أحد زملائي وسألني ساخرًا: «إذًا، تختصر هذه المعادلة معظم علم الحفريّات؟»

بالنسبة لويلسون، كان مجال علم الأحياء التطوري مهيئًا لإحداث مثل هذا النوع من الاضطراب، وكانت فكرة زوكركاندل وبولينج عن البروتينات كمعالم في التاريخ تناسب أسلوبه البحثي تمامًا – فقد كانت بسيطة، ويمكن اختبارها ببيانات جديدة. تملك الحيوانات العديد من البروتينات، والكشف عن تركيب البروتينات يتقدم بانتظام كبير، وإذا كانت ثمة إشارة تاريخية قوية متضمنة في البيانات، فلن يجدها ويلسون فحسب، بل سيعتصر كل استنتاج محتمل منها.

وضع ويلسون صوب عينيه هدفًا عاليًا، وكان سؤاله: ما مدى ارتباط البشر بالرئيسيات الأخرى؟ إذا كان هناك أي سؤال من شأنه أن يثير العاصفة، فهو هذا. وبما أن الأدلة الأحفورية كانت قليلة نسبيًّا بالنسبة لهذا الجزء من الشجرة التطورية، فإن النهج الجزيئي سيكون ذا دلالة خاصة.

كانت لدى ويلسون قدرة شبه سحرية على جذب الطلاب إلى فلكه، ورعاية مواهبهم، ومساعدتهم في تحقيق اكتشافات بالغة الأثر بأنفسهم. بعد التحاقها بالجامعة في الغرب الأوسط، انتقلت ماري كلير كينج غربًا لدراسة الإحصاء. وعند وصولها إلى كاليفورنيا في منتصف الستينيات، فقدت شغفها بالرياضيات، وكانت تبحث عن مجال فكري جديد، وقد أوقدت دورة تدريبية في علم الوراثة قدّمها أحد كبار العلماء في بيركلي شغفها بهذا المجال، ثم جرّبت في حذر عالم الوراثة، فعملت مدة عام في أحد المختبرات لتكتشف أنها ببساطة لا تملك حساسية العمل في المختبر. ولأن مسيرتها العلمية لم تبدُ مبشرة جدًّا، حصلت على إجازة مدة عام للعمل مع رالف نادر في مجال النشاط الاستهلاكي. دعاها نادر للعمل معه في العاصمة، وهي خطوة كان من شأنها أن تؤدي بها إلى ترك الدِّراسات العليا، وقد فكرت في ذلك العرض عندما كانت تذهب للاحتجاجات في بيركلي. استحوذت الاحتجاجات على وقتها وفتحت عالمها على أُناس وشخصيات جديدة، وكان أحد تلك الشخصيات آلان ويلسون.

بعد إحدى المظاهرات، أقنع ويلسون كينج بالعودة إلى كلية

الدِّراسات العليا، حتى لو من باب الحصول على الدكتوراه فقط، كشهادة قد تساعدها في عملها في السياسة. وعلى الفور تقريبًا، انجذبت إلى أنشطة ويلسون المعتمدة على البيانات في مجال العلوم، لكن مختبر ويلسون قدم لها أيضًا تحديات جديدة تحتاج إلى التغلب عليها، فلم تعد في عالم المعادلات والأرقام، بل تعين عليها الآن أن تتعلم كيفية العمل مع: الدم، والبروتينات، والخلايا.

وما جعل الأمور مشحونة بشكلٍ أكبر هو أن ويلسون أراد منها أن تؤدي بعض المهام المخبرية المعقدة، فمنذ أن نشر زوكركاندل وبولينج عملهما الأولي حول البروتينات، كرّست مجموعة من المختبرات جهودها لفهم أي القردة الحية أقرب لنا، وكم مضى على انفصال جنسنا البشري عنها. اعتقد ويلسون ومجموعته أن الإجابات ستأتي من الحصول على أكبر قدرٍ ممكن من البيانات الجديدة. وعلى طريقة ويلسون الكلاسيكية، قررت كينج ألا تنظر في الهيموغلوبين فحسب، بل في كل بروتين يمكن أن تحصل عليه، فتزامُن الإشارات في العديد من البروتينات المختلفة لا بد أن يمثل إشارة تطورية قوية. حصل كل من كينج وويلسون على دم الشمبانزي من حدائق الحيوان المختلفة، وعلى دم الإنسان من المستشفيات. إذا لم تكن لدى كينج موهبة العمل المختبري، فعليها أن تخلق هذه الموهبة: يتجلط دم الشمبانزي بسرعة كبيرة، لذلك كان عليها أن تعمل بسرعةٍ أو أن تُطور أساليب جديدة. وفي النهاية، فعلت كل من الأمرين.

قررت كينج استخدام طريقة سريعة لاختبار الاختلافات بين

البروتينات. الفكرة هي نسخة بسيطة من تلك التي استخدمها زوكيركاندل قبل عقد. إذا اختلف بروتينان في تسلسل الأحماض الأمينية، فإن وزنهما سيختلف أيضًا. وفوق ذلك، فإن كونهما يحتويان أحماضًا أمينية مختلفة يعني أنهما سيحملان شحنات كهربائية مختلفة. من وجهة نظر فنية، إذا وَضعت تلك البروتينات معلقةً في محلول هلامي، ثم مررت تيارًا عبر الهلام، فإن البروتينات ستهاجر إلى إحدى الجهتين، منجذبة بفعل الشحنة. والبروتينات المتماثلة ستهاجر بنفس السرعة، أمّا البروتينات المختلفة، فلن تتحرك بنفس السرعة. يمكنك تصور أن الهلام يعمل بمثابة مضمار السباق، حيث الشحنة هي المحرك للسباق. البروتينات المتماثلة سوف تقطع مسافة مماثلة في نفس الوقت، وكلما زاد اختلافها، زاد تباعد مساراتها في الهلام.

بدأت كينج عملها وهي لا تزال غير واثقة من مهاراتها. ومما زاد الطين بلة أن ويلسون ذهب إلى إفريقيا حينها، وتركها بمفردها إلى حدٍّ كبير خلال إجازة التفرغ العلمي التي أخذها مدة عام. كانت تحاول الاتصال به هاتفيًّا كل أسبوع لمراجعة بياناتها، لكنها كانت تبقى لأيام عدة دون أن تجد رأيًا يوجهها.

في البداية، لم تسر الأمور على ما يُرام، فتمكنت كينج من استخراج بروتينات الشمبانزي والبشر ووضعها على الهلام، ثم مررت الشحنات في الهلام، لكن بروتينات الشمبانزي والبشر تحركت تقريبًا نفس المسافة لكل البروتينات تقريبًا. لم ترَ أي اختلافات ذات معنى بين البشر والشمبانزي، هل استخرجت البروتينات بشكل

صحيح؟ وهل تعاملت مع الهلام بشكلٍ خاطئ؟ بدت آمالها في تحقيق سبق محكومة بالفشل.

خلال اتصالاتها المنتظمة، كانت كينج تشارك بياناتها مع ويلسون الذي كان يجابه نتائجها بطريقةٍ نموذجية، وأسئلة حول الأسلوب الذي استخدمته كما لو كان لا يزال في بيركلي، وبصرف النظر عن قوة النقد الذي وجهه لعملها بكل وسيلة يمكن تصورها، فقد ظلت نتائجها قائمة. كانت تسلسلات البروتين لدى البشر والشمبانزي متطابقة تقريبًا، ولم يكن بروتين واحد فقط هو الذي يروي القصة، بل كان هناك أكثر من أربعين بروتينًا منها. في الواقع، لم تكن كينج تتخبط بلا هدف، لقد كانت تكشف شيئًا جوهريًا عن: الجينات، والبروتينات، والتطور البشري.

ثم قارنت كينج البشر والشمبانزي بالثدييات الأخرى. وهنا أصبحت أهمية اكتشافها واضحة. يتشابه البشر والشمبانزي وراثيًّا أكثر مما يتشابه نوعان مختلفان من الفئران. تختلف الأنواع المتطابقة تقريبًا من ذبابة الفاكهة عن بعضها وراثيًّا أكثر مما يختلف البشر والشمبانزي عن بعضهما. البشر والشمبانزي متطابقان تقريبًا على مستوى البروتينات والجينات.

كشفت تجارب الهلام التي أجرتها كينج عن مفارقة عميقة.

إن الاختلافات التَّشريحية بين البشر والشمبانزي، بما في ذلك تلك التي تمثل جوهر تفردنا البشري - الأدمغة الأكبر، والمشي على قدمين، ونسب الوجه، والجمجمة، والأطراف - لم تكن ناتجة عن الاختلافات في البروتينات أو الجينات التي تحمل رموزها. لكن إذا

كانت البروتينات والأحماض النووية الذي تكون تلك الجزيئات متماثلة إلى حدٍّ كبير، إذًا فما الذي دفع إلى ظهور الاختلافات؟ كان لدى كينج وويلسون حدس، لكن لم تكن لديهما التقنيّة اللازمة لاختباره.

وقد أكد العلم الحديث ما اكتشفته كينج وويلسون لأول مرة. وبمقارنة الجينوم Genome الكامل، نجد أن الشمبانزي والبشر متشابهون بنسبة تتراوح بين 95٪ إلى 98٪.

لم تأتِ الاكتشافات التالية على أيدي طالبة ومرشدها يعملان بمفردهما، بل كانت تحتاج إلى العلم الكبير - وهو نوع من العلم يُعلن نتائجه الرؤساء ورؤساء الوزراء.

جينوم بلا جينات:

عندما عقد الرئيس بيل كلينتون ورئيس الوزراء توني بلير مؤتمرًا صحفيًّا مع رئيسي الفريقين المتنافسين اللذين يعملان على سَلسَلة الجينوم البشري - الفريق الممول من الحكومة بقيادة فرانسيس كولينز والفريق الخاص الذي يديره كريج فينتر - لم تكن لديهما سوى مسودة تقريبية للغاية للجينوم البشري أعلنا عنها. وبالرغم من الضجة، ففي وقت الإعلان في عام 2000، كانت أجزاء كبيرة من الجينوم مفقودة، ولم يكن يُعرف إلا القليل عن الأجزاء التي تُعد مهمة لصحة الإنسان ونموه.[44]

(44) تغطي العديد من مصادر الويب تاريخ مشروع الجينوم البشري وتأثيره:
"The Human Genome Project (1990–2003)," The Embryo Project Encyclopedia, https://embryo.asu.edu/pages/human-genome-project-1990-2003; "What Is the Human Genome Project?," National Human

لم يكن تأثير النتائج الأولية لمشروع الجينوم البشري يتعلق بالجينات بقدر ما كان يتعلق بالتقنية.

أطلق السباق لسَلسَلة الجينوم البشري موجة فوران تقنيّة لا تزال مستمرة حتى يومنا هذا. هناك قانون شهير لجوردون مور في عام 1965 يتنبأ بأن سرعة المعالجات الدقيقة سوف تتضاعف كل

Genome Research Institute, https://www.genome.gov/ 12011238/an-overview-of-the-human-genome-project/; and https://www.nature.com/scitable/topicpage/sequencing-human genome-the-contributions-of-francis-686.

تشمل الأوراق العلمية الرئيسة حول المشروع: الاتحاد الدولي لسَلسَلة الجينوم البشري:
"Finishing the Euchromatic Sequence of the Human Genome," Nature 431 (2004): 931–45; and International Human Genome Sequencing Consortium, "Initial Sequencing and Analysis of the Human Genome," Nature 409 (2001): 860–921.

بعض الكتب ذات الصلة بمشروع الجينوم البشري تشمل:
Daniel J. Kevles and Leroy Hood, eds., The Code of Codes (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2000); and James Shreeve, The Genome War: How Craig Venter Tried to Capture the Code of Life and Save the World (New York: Random House, 2004). A firsthand account is John Craig Venter, A Life Decoded: My Genome: My Life (New York: Viking Press, 2007).

هناك عدد كبير من المؤلفات حول بنية الجينوم وعدد الجينات، بما في ذلك عدد من المشاريع البارزة متعددة الباحثين. بعض الكتابات التمهيدية، ذات المراجع الجيدة، تشمل:
A. Prachumwat and W.-H. Li, "Gene Number Expansion and Contraction in Vertebrate Genomes with Respect to Invertebrate Genomes," GenomeResearch 18 (2008): 221–32; and R. R. Copley, "The Animal in the Genome: Comparative Genomics and Evolution," Philosophical Transactions of the Royal Society, B 363 (2008): 1453–61.

تملك مجلة نيتشر Nature موقعًا جيدًا كتمهيد:
https://www.nature.com/scitable/topicpage/eukaryotic-genome-complexity-437

عامين. ونحن نشعر بنتائج هذه الزيادة مع كل جهاز رقمي نشتريه، فتصبح أجهزة الحاسوب والهواتف أقوى وأرخص مع مرور كل عام. ولقد حطمت تقنيّة الجينوم حتى معدلات التقدم تلك. استغرق مشروع الجينوم البشري أكثر من عقدٍ، وتكلف أكثر من 3.8 مليار دولار، وتضمّن غرفًا مليئة بالآلات. أمّا اليوم، فيوجد تطبيق لسَلسلة الجينات، وأجهزة سَلسَلة محمولة موجودة بالفعل في السوق.[45]

وبمجرد الانتهاء من رسم خريطة الجينوم البشري، ظهرت سنويًّا خرائط جينوم للأنواع الأخرى. واليوم يعلن عن خرائط الجينوم بسرعة كبيرة، بحيث أصبحت الوتيرة محدودة فقط بالمعدل الذي تُنشر به المجلات العلمية. كان لدينا: مشروع جينوم الفأر، ومشروع جينوم الزنبق، ومشروع جينوم الضفدع - مشاريع لكل شيء من الفيروسات إلى الرئيسيات.

في البداية، كان نشر أحد مشاريع الجينوم حدثًا كبيرًا، تَظهر نتائجه في مجلات القائمة الأولى وسط ضجة كبيرة في الصحافة. في أيامنا هذه، ما لم تكن هناك عملية بيولوجية مهمة أو مسألة صحية على المحك، تُنشر مشاريع الجينوم الجديدة دون تنويه تقريبًا.

وبالرغم من تلاشي بريق أبحاث الجينوم، فإنَّها لا تزال تمثل ثروة

(45) تسمح متصفحات الجينوم القوية للعلماء بمقارنة جينات وجينوم الأنواع المختلفة. كما تتضمن بعض أكثرها استخدامًا هو إنسمبلENSEMBL
: https://useast.ensembl.org/
وفيستا VISTA، ;http://pipeline.lbl.gov/cgi-bin/gateway2
وأداة البحث بلاستBLAST ، .https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi
جربها. فهي تضع عالمًا من الاكتشافات في متناول يدك.

من شأنها أن تُبهج وتأسر: إميل زوكركاندل، ولينوس بولينج، وألان ويلسون.

والآن قد أصبحت لدينا جينوم: الذباب، والفئران، والبشر، يمكننا أن ننظر فيها ونطرح أسئلة مركزية تتعلق بالحياة: ما علاقة القرابة بين الأنواع وبعضها؟ وما الذي يجعل كل منها مختلفًا؟

يتألف كل منا من: تريليونات الخلايا - عضلات، وأعصاب، وهيكل العظمي، والمئات غيرها - التي تعمل معًا، وكلها متراصة ومتصلة بالطريقة المُثلى. تعيش الدودة المفلطحة، الربداء الرشيقة[46] Caenorhabditis elegans بـ 956 خلية فقط. وإذا لم يكن هذا مفاجئًا بما يكفي، فتأمل الآتي: على الرغم من الاختلافات الشاسعة في عدد الخلايا وتعقيد الأعضاء وأجزاء الجسم، فإن كل من البشر والديدان لديهم نفس العدد من الجينات، أي: ما يقارب عشرين ألفًا. والديدان هي البداية فقط. فالذباب أيضًا لديه نفس العدد تقريبًا الذي لدينا.

في الواقع، تعد الحيوانات مُقِلة مقارنة بالنباتات، مثل: الأرز، وفول الصويا، والذرة، والكسافا التي تحتوي جميعها ضعف عدد الجينات تقريبًا. ومهما يكن ما يحرك تطور الأعضاء والأنسجة والسلوكيات الجديدة المعقدة في عالم الحيوان، فالأمر لا يرتبطُ بوجود عدد أكبر من الجينات.

والأغرب من ذلك هو تنظيم الجينوم نفسه. تَذكر تعويذتنا:

---

(46) كذا في الأصل، غير أنَّ الربداء الرشيقة من الديدان الأسطوانية وليس المفلطحة. (المترجم).

الجينات عبارة عن شريط من القواعد التي تُترجم إلى سلاسل من الأحماض الأمينية، وهذه السلاسل الأمينية تصنع البروتينات. في جوهر الأمر، تمثل الجينات القالب الجزيئي للبروتينات. وعندما يُنشر تسلسل جيني، يكون مطلوبًا من المؤلفين إتاحة تلك البيانات للجمهور وإيداع المعلومات في قاعدة بيانات حاسوبية وطنية. وبعد عقودٍ من العمل على الجينات، أصبحت هذه المستودعات عامرة بتسلسلاتٍ من آلاف الجينات من آلاف الأنواع، كما يمكنك الآن الدخول من حاسوبك، وكتابة تسلسلٍ ما، ومعرفة أي جين من أي الأنواع يطابقه. وعندما تقارن الجينوم بأكمله بالجينات الموجودة في قواعد البيانات تلك، يمكنك أن تحصل على فكرة عن الجينات الموجودة بداخله من خلال النظر إلى ما يطابقها. في مشاريع الجينوم المتتالية التي نُشرت على مدى العقدين الماضيين، هناك ملاحظة واحدة واضحة تمامًا: الجينات نادرة في الجينوم. إذا كانت الجينات هي الجزء من الجينوم الذي يحمل رموز البروتينات، فيبدو أن معظم الجينوم لا يشارك في تصنيع البروتين.

إن التسلسلات الجينية التي ترمز للبروتينات تشكل أقل من 2٪ من الجينوم البشري. وهذا يعني أن نحو 98٪ منه لا يحمل أي جينات على الإطلاق.

الجينات ليست سوى جزر في بحر من الحمض النووي DNA. وفيما عدا استثناءات نادرة، يسري هذا النمط على كل الأنواع من الديدان وحتى الفئران. لكن، إذا كان معظم الجينوم لا يحتوي جينات ترمز للبروتينات، فما وظيفته؟

البكتيريا المنقذة:

بعد أن أديا الخدمة العسكرية في المقاومة الفرنسية خلال الحرب العالمية الثانية، بدأ عالما الأحياء الفرنسيان: فرانسوا جاكوب (1920-2013)، وجاك مونود (1910-1976) دراسة البكتيريا لفهم كيف تهضم السكر. وإذا كان هناك سؤال يبدو تجريديًا للغاية، وأبعد ما يكون عن الإنسان، فهو هذا السؤال.[47]

كشف جاكوب ومونود أن البكتيريا الإشريكية القولونية الشائعة يمكنها هضم نوعين من السكر الموجود في بيئتها، الجلوكوز واللاكتوز. الجينوم البكتيري بسيط نسبيًا.

إذ تحمل امتدادات طويلة جينات تحتوي المعلومات اللازمة لتكوين البروتينات التي تهضم كل نوع من السكر. وعندما يكون الجلوكوز وفيرًا، ويكون اللاكتوز نادرًا، يُصنِّع الجينوم البروتين

---

(47) يُعد بحث فرانسوا جاكوب وجاك مونود الكلاسيكي واحدًا من أعظم الأبحاث في علم الأحياء:

"Genetic Regulatory Mechanisms in the Synthesis of Proteins," Journal of Molecular Biology 3 (1961): 318–56.

من الصعب على المبتدئ قراءة ذلك البحث. للاطلاع على تفصيل شامل وسهل القراءة، راجع هذا الكتاب الكلاسيكي في تسهيل العلوم: هوراس فريلاند جودسون، اليوم الثامن من الخلق: صناع الثورة في علم الأحياء.(New York: Simon and Schuster, 1979)

للاطلاع على الخلفية المذهلة لأعمال جاكوب ومونود، راجع القصة المؤثرة والموثوقة التي كتبها شون بي كارول. العبقرية الشجاعة: عالم وفيلسوف ومغامراتهما الجريئة من المقاومة الفرنسية إلى جائزة نوبل.(New York: Norton, 2013) اعتقدت أنني أعرف كل شيء عنهما، لكن هذا الكتاب فتح لي عالمًا كاملًا.

كتب شون ب. كارول أيضًا الكتاب الكلاسيكي عن كيفية تأثير تنظيم الجينات في التطور: أجمل الأشكال التي لا نهاية لها: العلم الجديد للنمو التطوري (New York: Norton, 2006).

الذي يهضم الجلوكوز، وعندما يكون العكس هو الصحيح، فإن الجينوم يُصنع البروتين الذي يهضم اللاكتوز. وبالرغم من أن هذا الوضع قد يبدو بسيطًا وبدهيًّا، فإنَّه كان الأساس لثورة في علم الأحياء.

اكتشف العلماء عنصرين في الجينوم البكتيري:

في العنصر الأول: تحتوي الجينات معلومات حول بنية كل بروتين يهضم السكريات المختلفة. وهي قواعد ATGC التي تُترَجم إلى تسلسلات الأحماض الأمينية التي يتألف منها البروتين. وتحيط بالجينات سلاسل أخرى أقصر من قواعد ATGC، والتي لا ترمز للبروتين على الإطلاق. وعندما يرتبط جزيء آخر بتلك الامتدادات، فإنه يُنشِّط الجين أو يوقفه. وهذا هو العنصر الثاني. تخيل أن هذه السلاسل الأقصر مفاتيح جزيئية تتحكم في الوقت الذي يصبح فيه الجين نشطًا ويصنّع البروتين. في البكتيريا، تقع الجينات والمفاتيح التي تتحكم في نشاطها جوار بعضها داخل الجينوم. واعتمادًا على نوع السكر الموجود، يتحكم تفاعل جزيئي في تحديد الجين الذي سيُنشّط، وبالتالي، تحديد البروتين الذي سيُصنّع.

اكتشف جاكوب ومونود أن الجينوم البكتيري عبارة عن عملية تصنيع بيولوجية تصنّع البروتينات في المكان والزمان المناسبين. وهناك مكونان: الجينات التي ترمز للبروتينات والمفاتيح التي تخبر الجينات متى وأين تصبح نشطة. ونتيجة عملهما هذا، فاز الثنائي بجائزة نوبل في الفسيولوجيا أو الطب لعام 1965.

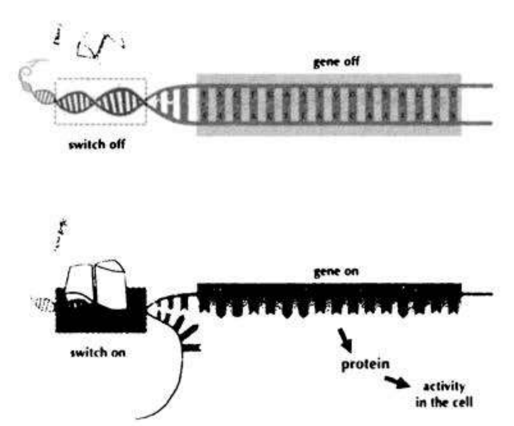
في العقود التي تلت حصول جاكوب ومونود على جائزة نوبل،

كُشف عن أن عملية تصنيع البروتين ذات المرحلتين هي سمة عامة لجميع أنواع الجينوم. تمتلك: الحيوانات، والنباتات، والفطريات جينات ترمز للبروتينات ومفاتيح جزيئية وظيفتها تشغيل الجينات وإيقافها.

يوفر اكتشافهما أدلة لفهم ما الذي يجعل: الخلايا، والأنسجة، والأعضاء متميزة؟ جسم الإنسان هو في الأساس حزمة منظمة للغاية مؤلفة من أربعة تريليونات خلية من مائتي نوع مختلف، منظمة ضمن أنسجة، من العظام والمخ إلى الكبد والأنسجة الهيكلية. يتألف النسيج الغضروفي من خلايا تصنع الكولاجين والبروتيوجليكان ومكونات أخرى تتحد مع الماء والمعادن في الجسم لتعطي الغضروف خصائصه التي تجعله مرنًا وداعمًا في نفس الوقت. وتختلف كوكبة البروتينات التي تشكل الخلية العصبية عن تلك الموجودة في: الغضاريف، أو العضلات، أو العظام.

وهنا تكمن المسألة: تحتوي كل خلية من خلايا الجسم نفس تسلسل الحمض النووي، المشتق من البويضة المخصبة التي بدأت الكائن الحي. فالحمض النووي الموجود داخل الخلية العصبية مطابق تقريبًا للحمض النووي الموجود في: الغضاريف، أو العضلات، أو العظام. وإذا كانت كل خلية تحتوي نفس الجينات بداخلها، فإن الاختلافات بين الخلايا المتنوعة تأتي من أي الجينات التي تنشط في صنع البروتينات. أصبحت المفاتيح التي اكتشفها جاكوب ومونود ضرورية لفهم كيفية بناء الجينوم لـ: الخلايا، والأنسجة المختلفة، والأجسام.

إذا تخيلنا أنَّ الجينوم وصفة، فإن الجينات ترمز للمكونات، وتحتوي المفاتيح تعليمات حول متى وأين يُضاف كل مكون. وإذا كان 2٪ من الجينوم يتألف من جينات تصنّع البروتينات، فإن جزءًا من الـ 98٪ الأخرى يحتوي المعلومات التي تخبر الجينات متى وأين تكون نشطة.



عندما ينشط المفتاح الجيني، عادةً عندما ترتبط به بروتينات محددة، يصبح الجين نشطًا ويصنع البروتين.

ولكن كيف يبني الجينوم جسمًا؟ وكيف يُحدث التغيير في الأنواع على مدار تاريخ الحياة؟ لم يكن أحد يعرف ذلك في وقت مشروع الجينوم البشري، لكن وجود عدد قليل من الجينات وندرتها في الجينوم لم يكن سوى القطرة الأولى من غيث المفاجآت القادمة.

أصابعٌ تشير إلى الطريق:

اعتقد البحارة في الماضي أن القطط ذات الستة أصابع يمكن أن

تجلب الحظ السعيد على السفن.

كان يُعتقد أن هذه القطط التي تسمى: «ملتصقات الأصابع» تصيد الفئران أفضل؛ لأن أقدامها العريضة يمكن أن توازنها في أثناء وجودها في البحر. وكان لدى ستانلي ديكستر، وهو قبطان بحري، إحدى هذه القطط، وأعطى واحدة منها لصديقه إرنست همنجواي الذي كان يعيش في كي ويست في ذلك الوقت.

أنجبت تلك القطة الصغيرة التي تُدعى: «سنو وايت»، سلالة من القطط ذات الأصابع الست لا تزال مستمرة حتى يومنا هذا في أملاك عائلة همنجواي. إلى جانب أنها من المعالم البارزة للسياح، لعبت هذه القطط دورًا في تشكيل مفهوم جديد لطريقة عمل الجينوم.



قطط همنجواي، أو القطط ملتصقة الأصابع، لها أقدام عريضة مؤلفة من ستة أصابع أو أكثر.

وفي بعض الأحيان، تكون لدى البشر أيضًا أصابع إضافية في

الأيدي والأقدام. يولد قرابة واحد من كل ألف شخص بإصبع إضافي في اليد أو القدم. وفي حالة متطرفة، في عام 2010، وُلِد طفل في الهند بأربعة وثلاثين إصبعًا. يمكن أن تظهر الأصابع الإضافية على جانب الإبهام أو الخنصر، أو في الأصابع المنقسمة والمتشعبة. وتعد حالة الأصابع الإضافية الموجودة على جانب الإبهام، والمعروفة باسم: «العَنش قبل المحوري preaxial polydactyly» ذات أهمية بيولوجية خاصة.

في ستينيات القرن العشرين، كان العلماء الذين يدرسون بيض الدجاج يستكشفون كيفية تكوين الأجنحة والأرجل في الجنين في أثناء النِّمو. تخرج الأطراف من جسم الجنين على هيئة براعم دقيقة تشبه الأنابيب الصغيرة. وعلى مدى بضعة أيام - يختلف العدد باختلاف الأنواع - ينمو البرعم، وتبدأ العظام في التشكل، ويصبح الطرف النامي على شكل مجداف عريض، ثم تتشكل: الأصابع، والرسغين، وعظام الكاحل داخل هذا السطح المتوسع.

اكتشف العلماء أنه من خلال إزالة الخلايا أو نقلها داخل منطقة المجداف، يمكنهم تعديل عدد الأصابع التي تتشكل. فإذا استأصلوا شريطًا صغيرًا من الأنسجة من النهاية الطرفية، يتوقف نمو الطرف. وإذا قصوا هذا الشريط في أثناء النُّمو المبكر، فقد ينمو للجنين طرف بأصابع قليلة أو بدون أصابع. وإذا أزالوا الشريط في مراحلٍ متأخرة قليلًا، فقد يفتقر الجنين إلى إصبع واحد فقط. إن مرحلة النِّمو التي تُجرى فيها التجربة مهمة، فالإزالة المبكرة لها آثار دراماتيكية على الجنين بشكلٍ أكبر من الإزالة المتأخرة.

لأسباب ضاعت في الزمن، استأصل جون سوندرز وماري جاسلينج من جامعة ويسكونسن شريحة صغيرة من الأنسجة من قاعدة المجداف النامي للبرعم الطرفي. تلك الرقعة لا تبدو مميزة - لا شيء فيها يبدو فريدًا. وهي تقع على جانب المجداف، حيث سيتشكل الخنصر في النهاية. أخذ الباحثون هذه القطعة من الأنسجة التي يبلغ طولها أقل من ملليمتر واحد، وطعّموها على الجانب الآخر من البرعم الطرفي، عند قاعدة المجداف، حيث سيتشكل الإصبع الأول. وبعد إعادة الجنين إلى البيضة، يتركونه ليكتمل نموه.

كان الجنين الذي خرج مفاجأة كبيرة. كان يشبه أي كتكوت عادي، بـ: منقار، وريش، وأجنحة. لكن أجنحته، على عكس الأجنحة العادية ذات نمط الأصابع الثلاث الممدودة، كان بها ما يصل إلى ستة أصابع. إن شيئًا ما في تلك الرقعة الصغيرة من الخلايا يحتوي تعليمات لصنع الأصابع.

وسرعان ما دخلت مختبرات أخرى على خط هذا البحث. ففي السبعينيات، وضعت مجموعة بحثية من إنجلترا شرائح صغيرة من القصدير بين رقعة النسيج تلك وبقية البرعم الطرفي. فكان بالأجنحة التي نمت أصابع أقل من المعتاد، عملت الرقاقة بمثابة حاجز بين الرقعة والخلايا الأخرى. والمعنى الضمني هو أن مركبًا ما ينبثق من تلك الرقعة من الخلايا، وينتشر عبر الطرف النامي، ويحفز تكوين الأصابع. وعندما يوقِف حاجز القصدير هذا الانتشار، يتطور عدد أقل من الأصابع، وعندما يُوضع الحاجز عند نقطة مختلفة من الطرف، تتشكل المزيد من الأصابع. ولكن، ما

المركب الذي يُفرز؟

وفي أوائل التسعينيات، استخدمت ثلاثة مختبرات، تعمل بشكلٍ مستقل، تقنيات جديدة لعزل البروتين والجين الذي يصنّعه. يصنّع الجين بروتينًا في أثناء نمو الأطراف وينتشر عبر مجداف البرعم الطرفي. وجد الباحثون أنه في أثناء انتشاره يخبر مجموعات من الخلايا بأي الأصابع ينبغي أن تتشكل. المستويات العالية من البروتين تتسبب في تكوين الخنصر، أو الإصبع الخامس. والمستويات المنخفضة تكون الإصبع الأول أو الإبهام. والمستويات المتوسطة تكون الأصابع بينهما. أطلقت إحدى هذه المجموعات من الباحثين على الجين اسم **القنفذ سونيك**، في إشارة إلى الجين المعروف باسم **القنفذ** الذي ينشط في أنواع أخرى، وإلى لعبة فيديو مشهورة في ذلك الوقت.[48]

ولكن ما الذي يخبر الجين بتكوين أصابع أقل أو أكثر؟ هل هناك مفاتيح تعمل على جين القنفذ سونيك وتؤثر في تطور الأصابع؟ ستكون الإجابة على هذا السؤال مفتاحًا لفهم كيفية بناء الجينات للأجسام وكيفية تطورها.

وكما هي الحال مع أهم اللحظات في الحياة وفي العلم، تبدأ هذه القصة بحادث.

---

(48) الحديث عن دور جين القنفذ سونيك في تشوهات الأطراف موجود في:
E. Anderson et al., "Human Limb Abnormalities Caused by Disruption of Hedgehog Signaling," Trends in Genetics 28 (2012): 364–73.
تحدث الحالات الشاذة عن طريق تغيير نشاط سونيك، أو عن طريق تعطيل مسار الجينات التي يتفاعل معها سونيك.

في أواخر التسعينيات، كان فريق من علماء الوراثة في لندن يدغمون قصاصات من الحمض النووي في جينوم الفئران لدراسة تكوين الدماغ. تلك القطع هي جزء من آلة جزيئية صغيرة يصنعها الباحثون ويربطونها بالحمض النووي، وتكون بمثابة علامة على نشاطه. بين الحين والآخر يحدث خطأ ما في هذا النوع من التجارب. يمكن لتلك القطعة أن تلتصق في أي مكان في الجينوم. إذا التصقت في جزء مهم بيولوجيًا من الجينوم، يمكن أن تتشكل طفرة. وهذا ما حدث في تجربة هذا الفريق: بعض الفئران المحقونة نمت لها أدمغة طبيعية، ولكن كانت لديها أصابع أيادي وأقدام مشوهة.

في الواقع، كانت لدى أحد الفئران أصابع إضافية وأقدام عريضة جدًّا، لا تختلف عن قطط همنجواي ملتصقة الأصابع. استطاع الفريق توليد سلالة كاملة من هذه الطافرات، ومنحوها اسمًا وفق التقاليد العلمية. لقد أطلقوا عليهم اسم: «الساسكواتش»؛ نسبة إلى المخلوق ذي القدم الكبيرة في عالم الخوارق.

وبما أن طافراتهم أصبحت الآن عديمة الفائدة لدراسة الأدمغة، فقد تساءل الفريق عما إذا كان لدى أي من علماء الأحياء الذين يدرسون الأطراف اهتمامًا بها. فأعدوا ملصقًا في اجتماع علمي يعلنون فيه نتائجهم.

يُعتقد أحيانًا أنَّ الملصقات التي تكون في المؤتمرات العلمية تحتوي النتائج العلمية من الدرجة الثانية، أمّا أفضل النتائج، فتُقدم في شكل محاضرات. لكن الملصقات تتميز أيضًا بعنصر اجتماعي، إذ يدور الناس حولها ويناقشون ما فيها من العلم. وحسب خبرتي، فإن

الشراكات البحثية التي تبدأ نتيجة الملصقات أكثر من تلك التي تبدأ بعد المحاضرات.

أظهر المُلصق نوعًا من العَنش المعروف أنه ينشأ من طفرة في جين القنفذ سونيك، فالأصابع الزائدة كانت على جانب الخنصر، تحدث هذه الطفرات بسبب تنشيط القنفذ سونيك في الجانب الخاطئ من الطرف. لذا كانت الخطوة التالية الواضحة هي النظر في نشاط سونيك في تلك الطافرات، وهي التجارب التي أجراها الفريق لعرضها في ملصقهم. وبعد أن صنعوا الطفرة عن طريق الخطأ، نظروا إلى الأطراف النامية الصغيرة تحت المجهر. توسع نشاط سونيك في الطافرات بشكلٍ غير طبيعي، تمامًا كما هو مُتوقع في هذا النوع من العَنش. أدت هذه الملاحظات إلى فرضية مفادها: إن الساسكواتش الطافر قد أُنتج عندما التصقت القصاصة بجين القنفذ سونيك أو قُربه.

لم يجذب ملصق الفريق أحد علماء بيولوجيا الأطراف، بل جذب انتباه روبرت هيل، عالم الوراثة البارز في إدنبرا الذي كان يمر عرضًا وشاهد صور طافرات الساسكواتش. ومن هنا بدأ برنامج بحثي جديد.

اكتسب مختبر هيل شهرة واسعة لفهمه طريقة عمل الجينوم في تطور العين. ومن خلال هذا العمل، طور فريقه، ومن ضمنهم العالمة الشابة لورا ليتيس، مجموعة أدوات لفحص الجينوم للعثور على أجزاء من الحمض النووي. وبما أنهم كانوا يعرفون تسلسل الحمض النووي للقصاصة، كان عليهم أن يفحصوا الجينوم بأكمله

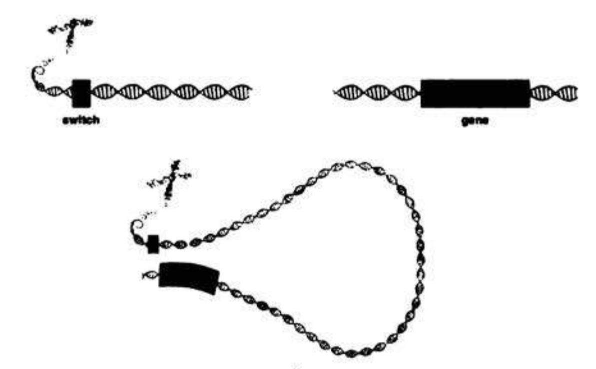
بحثًا عن المكان الذي انتهت إليه. كانت ليتيس قد بدأت قريبًا مسيرتها المهنية وما تزال خبرتها قليلة للغاية، ولكن كانت تملك الصبر ومجموعة المهارات اللازمة لتحقيق المطلوب.

استخدم الفريق خُدعة بسيطة لتحديد الموقع التقريبي للطفرة على شريط الحمض النووي. إذ ربطوا صبغة بجزيء صغير كان متكاملًا مع قطعة الحمض النووي التي شكلت الطفرة. والفكرة أنَّ هذا التسلسل سيتوجه إلى الطفرة، ويلتصق بها، ومن ثم ستضيئ الصبغة في ذلك الموقع. وبما أنَّ الطفرة كانت تؤثر في نشاط القنفذ سونيك، فمن المحتمل أن توجد في أحد مكانين: في الجين نفسه أو في منطقة التحكم المجاورة له مباشرة، مثل: مناطق التحكم التي اكتشفها جاكوب ومونود في البكتيريا.

لم يؤثر هذا التفاعل في جين القنفذ سونيك، فمنطقته لم تُضِئ بفعل الصبغة. مهما يكن الشيء الذي أثر في القنفذ سونيك في الطرف، وسبب العَنش، لم يكن طفرة في الجين أو بالتبعية تغيرًا في البروتين الناتج عنه. وعليه خلص الفريق، كما توصل جاكوب ومونود، إلى أن إحدى مناطق التحكم المجاورة قد تأثرت. ولكن عندما نظروا، رأوا أن تلك المنطقة كانت طبيعية تمامًا. إذًا، إذا لم يتأثر الجين أو المفتاح المجاور له، فما سبب الطفرة؟

كما يعلم أي شخص حاول استعادة صاروخ هواة في يوم عاصف، يمكنك إضاعة الوقت الطويل في البحث في مكان قريب، بينما ينبغي عليك البحث في مكانٍ بعيد جدًّا. بدأ هيل وليتيس والفريق بالبحث الطويل في الجينوم بأكمله حتى رأوا الإشارة.

كانت القصاصة التي أدخلوها على بُعد مليون قاعدة تقريبًا من جين القنفذ سونيك. وهذه مساحة شاسعة من الأرضية الجينية بين موقع الطفرة وموقع الجين سونيك. معتقدين أنهم قد أخطأوا، كرروا العملية وأعادوا تحليل النتائج. ولكن مهما حاولوا، ظلت النتيجة كما هي. كانت هناك رقعة صغيرة على بُعد مليون قاعدة من الجين تتحكم بطريقةٍ ما في نشاط القنفذ سونيك. كان الأمر أشبه بأن تجد مصباحًا في غرفة معيشة في فيلادلفيا، وتجد مفتاح إضاءته على جدار مرآب في ضواحي بوسطن.



توجد بعض المفاتيح الجينية بعيدًا عن الجين الذي تتحكم فيه. يلتف الحمض النووي، وينطوي، وينبعج ليُفتح ويُغلق بشكلٍ دائم، مما يعيد المفاتيح جوار الجينات لتشغيلها وصنع البروتين.

إذًا، ربما كانت التغييرات في ذلك الموقع البعيد هي مصدر الأصابع الإضافية؟ تتبع الفريق كل شخص أو قطة ذات ستة أصابع تمكنوا من العثور عليها – مرضى مصابون بالعَنش في هولندا، وطفل في اليابان، وحتى قطط همنجواي – وفحصوا أحماضهم النووية. وفي

كل حالة، وجدوا طفرة صغيرة في نفس المنطقة على بعد مليون قاعدة من جين القنفذ سونيك. بطريقةٍ ما، تؤدي طفرة صغيرة في الطرف البعيد من الجينوم إلى تغيّر في نشاط سونيك، ما يؤدي إلى تفعيله على نطاق واسع في الأطراف، ومن ثم ظهور أصابع أيدي وأقدام إضافية.

في أثناء سَلسَلة نمط قواعد ATGC في تلك المنطقة الخاصة، وجدوا أنَّ تلك الرقعة من الحمض النووي مميزة جدًّا. ويبلغ طولها حوالي ألف وخمسائة قاعدة، وتسلسلها متشابه بين مختلف المخلوقات. هذه المنطقة موجودة في البشر في نفس المكان تمامًا، مثل: الفئران، على بعد حوالي مليون قاعدة من الجين. وأيضًا في: الضفادع، والسحالي، والطيور. وهي موجودة في كل شيء له زوائد طرفية، حتى في الأسماك. هي موجودة في سمك السلمون، كما في أسماك القرش. كل مخلوق لديه جين القنفذ سونيك النشط في تطوير زوائده، سواء أكان في الأطراف أم الزعانف، لديه منطقة التحكم هذه على بعد مليون قاعدة تقريبًا. كانت الطبيعة تلفت انتباه العلماء إلى شيءٍ مُهم في هذا الترتيب الجيني الغريب.[49]

(49) العمل على المفاتيح بعيدة المدى المعروفة رسميًا بسم: "المعززات بعيدة المدى"، موجود في سلسلة من الأوراق البحثية الجميلة:

L. A. Lettice et al., "The Conserved Sonic hedgehog Limb Enhancer Consists of Discrete Functional Elements That Regulate Precise Spatial Expression," Cell Reports 20 (2017): 1396–408; L. A. Lettice et al., "A Long-Range Shh Enhancer Regulates Expression in the Developing Limb and Fin and Is Associated with Preaxial Polydactyly," Human Molecular Genetics 12 (2003): 1725–35; and R. Hill and L. A. Lettice, "Alterations to the Remote Control of Shh Gene Expression Cause Congenital Abnormalities,"

تغيير الوصفات:

للوهلة الأولى، قد يُدهش المرء من فكرة أن القطط والبشر المصابين بالعَنش يستطيعون النجاة حتى الولادة، فالقنفذ سونيك لا يتحكم فقط في الأطراف في أثناء التطور الجنيني، بل هو الجين الرئيس الذي يتحكم في نمو: القلب، والحبل الشوكي، والدماغ، والأعضاء التناسلية أيضًا. يشبه سونيك صندوق أدوات رئيس يأخذ النُّمو من مجموعة أدواته ما يحتاج إلى تكوين أعضاء وأنسجة متنوعة. وبناءً عليه، إن حدثت طفرة في جين القنفذ سونيك، فلا بد أن تؤثر في كل بنية ينشط فيها، وقد يكون لدى الطافرات تشوه في: النخاع الشوكي، والقلوب، والأطراف، والوجوه، والأعضاء التناسلية، وأعضاء أخرى. ولكن ما نوع الحيوان الذي يُحتمل أن يَنتج من طفرة في جين القنفذ سونيك؟ وبما أنه من الوارد أن تَنتُج الكثير من الأنسجة الشاذة من طفرة في القنفذ سونيك، فإنَّ الإجابة ستكون بالتأكيد هو حيوان ميت.

لكن الطريقة التي يُتحكم بها في القنفذ سونيك في أثناء النُّمو تضمن عدم حدوث هذه النتيجة. لماذا؟ لأنَّ الطفرات في منطقة

Philosophical Transactions of the Royal Society, B 368 (2013), http://doi.org/10.1098/rstb.2012.0357.

العديد من هذه المفاتيح طويلة المدى معروفة الآن. حول بيولوجيتها العامة وتأثيرها في التنمية والتطور، انظر:

A. Visel et al., "Genomic Views of Distant-Acting Enhancers," Nature 461 (2009): 199–205; H. Chen et al., "Dynamic Interplay Between Enhancer-Promoter Topology and Gene Activity," Nature Genetics 50 (2018): 1296–303; and A. Tsai and J. Crocker, "Visualizing Long Range Enhancer-Promoter Interaction," Nature Genetics 50 (2018): 1205–6.

التحكم في الأطراف تؤثر فقط في الأطراف. ولهذا السبب، فإنَّ المصابين بالعَنش الذين يوجد لديهم هذا النوع من طفرة القنفذ سونيك لديهم قلوب، وأحبال شوكية، وبنىً أخرى طبيعية، فالمفتاح الذي يتحكم في نشاط الجين خاص فقط بنسيج محدد، ويترك الباقي دون أن يتأثر.

تخيل منزلًا به العديد من الغرف، ولكل منها منظِّم حرارة خاص بها. سيؤثر تغيير حرارة السخان على درجة الحرارة في كل الغرف، لكن تغيير درجة حرارة منظم واحد سيؤثر فقط في الغرفة التي يتحكم فيها. وتنطبق نفس العلاقة على الجينات ومناطق التحكم فيها. فكما أن التغيير في حرارة السخان سيؤثر في المنزل بأكمله، فإن التغيير في الجين والبروتين الذي ينتج عنه يمكن أن يؤثر في الجسم بأكمله. وهذا التغيير الشامل سيكون كارثيًّا، وسيؤدي إلى طريق مسدود في مسار التطور، ولكن بما أن مناطق التحكم في الجينات فريدة لكل نسيج، مثل: منظم الحرارة في الغرفة، فإنَّ التغيير في عضو واحد لن يؤثر في أي عضوٍ آخر. يمكن للطافرات أن تتمكن من الحياة، ويمكن للتطور أن ينجح.

هناك نوعان من التغيرات الجينومية يمكن أن يلعبا دورًا في التحولات التطورية:

في النوع الأول: يمكن أن تؤدي التغيرات في الجينات إلى تكوين بروتينات جديدة، فقد تُحدث طفرة في تسلسل القواعد ATGC في الحمض النووي تغيرًا في سلسلة الأحماض الأمينية التي تصنع البروتين. وإذا تسببت طفرة الحمض النووي في دخول حمض أميني

مختلف على طول تلك السلسلة، فيمكن أن يَنتُج بروتين جديد. ويحدث هذا بوضوح في العديد من البروتينات الرئيسة في الجسم، مثل: جينات الهيموغلوبين التي درسها زوكركاندل وبولينج. والفكرة الأساسية هي أن التغير في البروتين يمكن أن يؤثر في الجسم في كل مكان يوجد فيه البروتين.

النوع الثاني من التغير الجينومي: يمكن أن يحدث في المفاتيح التي تتحكم في نشاط الجينات. وبعد رؤية عمل بوب هيل، أراد أحد المختبرات في بيركلي معرفة ما إذا كان لمفتاح القنفذ سونيك دور في تطور الأطراف. فبدأوا بالثعابين؛ لأنها تفتقر بالكلية إلى الأطراف. عندما استؤصلت منطقة الجينوم التي تحمل المفتاح من الثعبان ووُضعت داخل فأر، لم تتكون في أطراف الفأر أصابع. يبدو أن الثعابين اكتسبت، بمرور الوقت، طفرات في المفتاح الذي يتحكم في قدرتها على تكوين الأطراف. بروتين القنفذ سونيك الموجود في الثعابين طبيعي تمامًا، وكذلك قلوبها وأحبالها الشوكية وأدمغتها. التغير في المفتاح النشط في الأطراف يعني أنَّ نشاط سونيك في الأطراف فقط هو الذي تغير.[50]

تحمل هذه الخدعة الجينية أدلة على الآليات العامة لثورة التطور. وإذا جاز عد العقد ونصف العقد الماضيين مؤشرًا، فإنَّ التغيرات في المفاتيح التي تتحكم في نشاط الجينات هي المسؤول عن التحولات

---

(50) نُوقِش اختزال أطراف الثعبان والارتباط بالتغيرات في معزز جين سونيك بعيد المدى في:

E. Z. Kvon et al., "Progressive Loss of Function in a Limb Enhancer During Snake Evolution," Cell 167 (2016): 633–42.

الكبرى في تطور أجسام الفقاريات واللافقاريات في أعضاء مختلفة، مثل: الجماجم، والأطراف، والزعانف، وأجنحة الذباب، وأجسام الديدان، من بين أمثلة أخرى كثيرة. وفي حالة تلو الأخرى، لا تتعلق التحولات التطورية بالتغيرات في الجينات نفسها بقدر ما تتعلق بزمان ومكان نشاطها في النُّمو.[51]

قضى ديفيد كنجسلي، عالم الوراثة في جامعة ستانفورد، ما يقارب عقدين في دراسة سمكة أبي شوكة الصغيرة ثلاثية الأشواك، وهي سمكة تعيش في المحيطات والجداول حول العالم. لأسماك أبي شوكة مجموعة متنوعة من الأشكال: لبعضها أربع زعانف، وللبعض زعنفتان، ولبعضها الآخر أشكال مختلفة في الجسم وأنماط ألوان. هذا التنوع يجعل من أسماك أبي شوكة نظامًا ممتازًا لاستكشاف كيف يمكن للتغيرات الجينية أن تجعل الأسماك مختلفة عن بعضها. باستخدام تقنيّات الجينوم، تمكن كينجسلي من كشف المناطق الدقيقة من الحمض النووي المسؤولة عن معظم هذه التغييرات. وتقريبًا كلها كانت عبارة عن مفاتيح تتحكم في نشاط الجينات. تحتوي الأسماك التي تملك زعنفتين فقط جينًا ذا نشاط متغير بشكل كبير يثبّط نشاط الجين الضروري لتطور الزعنفة الخلفية. بيّن كنجسلي أن

(51) هناك عدد كبير من المؤلفات عن دور التغيرات في العناصر التنظيمية الجينية (المفاتيح). انظر:

M. Rebeiz and M. Tsiantis, "Enhancer Evolution and the Origins of Morphological Novelty,"Current Opinion in Genetics and Development 45 (2017): 115–23; and Sean B. Carroll, Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo (New York: Norton, 2006).

التغيّر لم يكن في الجين، بل في المفتاح الذي يتحكم في نشاط الجين. وخمِّن ماذا حدث عندما أخذ المفتاح من سمكة لها أربع زعانف ووضعه في السَّمكة التي عادة ما يكون لها زعنفتان فقط؟ استُعيدت الزعانف الخلفية عن طريق تصنيع طافرة بأربعة زعانف من أبوين بزعنفتين.[52]

لدينا الآن التقنيّة المطلوبة لفحص الجينوم بأكمله لمعرفة مكان وجود الجينات ومناطق التحكم بها. تقع مناطق التحكم في كل مكان في الجينوم، بعضها قريب من الجين، في حين أنَّ البعض الآخر مثل تلك التي تتحكم بالقنفذ سونيك، بعيدة. وقد يكون لبعض الجينات العديد من مناطق التحكم التي تؤثر في نشاطها، والبعض الآخر له منطقة واحدة فقط. ومهما كان عددها، وأينما كانت موجودة في الجينوم، ثمة أناقة، بل غموض، في كيفية عمل تلك الآلات الجزيئية.

تتيح لنا المجاهر الجديدة التي تسمح برؤية جزيئات الحمض النووي ذاته، تتيح لنا أيضًا رؤية ما يحدث عندما تُشغّل الجينات وتوقف.

لكي يصبح الجين نشطًا، يجب أن تبدأ لعبة انحناءات Twister جزيئية. تلتف المناطق غير النشطة من الجينوم بإحكام على نفسها، وتتحزم حول جزيئات صغيرة أخرى بحيث تتسع لها النواة. هذه المناطق معزولة، وبالتالي، فهي خاملة نسبيًّا. وقبل أن تصبح منطقة

---

(52) للأمثلة على سمكة أبي شوكة، انظر:

Y. F. Chan et al., "Adaptive Evolution of Pelvic Reduction in Sticklebacks by Recurrent Deletion of a Pitx1 Enhancer," Science 327 (2010): 302–5.

من الجينوم نشطة، فإنها بحاجة إلى أن تنحل وتفتح نفسها لتصنيع البروتين.

وتلك ليست سوى الخطوات الأولى في رقصة مصممة بدقة وظيفتها تشغيل الجينات وإيقافها. إذ لكي يصبح الجين نشطًا، يحتاج مفتاحه إلى الاتصال بجزيئات أخرى والارتباط بمنطقة مجاورة للجين نفسه. هذه الارتباطات تحفز الجين على إنتاج البروتين. وفي حالة القنفذ سونيك، يحتاج المفتاح إلى طي مسافة طويلة جدًّا لبدء نشاط الجين. إذًا، إليك الخطوات الكاملة للرقصة التي تحدث عندما تُشغّل الجينات: ينفتح الجينوم، ويكشف عن الجين ومنطقة التحكم فيه، وترتبط الأجزاء ببعضها، ويُصنَع البروتين. يحدث هذا في كل خلية، ومع كل بروتين.

يُلف شريط من الحمض النووي طوله ستة أقدام حتى يصبح أصغر من رأس الدبوس. تخيل شكله وهو ينفتح وينغلق في أجزاء من الثانية، ويتلوى ويدور لتنشيط آلاف الجينات في كل ثانية. منذ لحظة الحمل وطوال حياتنا كبالغين، تشتغل جيناتنا وتتوقف باستمرار. نبدأ كخلية واحدة. وبمرور الوقت، تتكاثر الخلايا، وتنشط بطاريات الجينات للتحكم في سلوكها لتكوين أنسجة وأعضاء أجسامنا. في أثناء كتابتي لهذا الكتاب، وفي أثناء قراءتك له، تعمل الجينات في جميع تريليونات خلايانا الأربعة. يملك الحمض النووي ما يعادل القوة الحاسوبية للعديد من أجهزة الحاسوب العملاقة. وباستخدام هذه التعليمات، يمكن لمجموعة صغيرة نسبيًّا مؤلفة من عشرين ألف جين أن تبني وتحافظ على الأجسام المعقدة

لـ: الديدان، والذباب، والبشر باستخدام مناطق التحكم المنتشرة عبر الجينوم. والتغييرات في هذه الآلة المعقدة والديناميكية بشكلٍ لا يصدق هي السبب وراء تطور كل مخلوق على وجه الأرض. إنَّ الحمض النووي، وهو يلتف وينحل وينطوي باستمرار، يشبه مايسترو الحركات الأكروباتية، قائد النُّمو والتطور.

يتحدث هذا العلم الجديد عن كفاح ماري كلير كينج لإيجاد الاختلافات بين البروتينات البشرية وبروتينات الشمبانزي قبل أربعة عقود. لقد تنبأت هي وألان ويلسون بأهمية المفاتيح الجينية في عنوان ورقتهما البحثية عام 1975، «التطور على مستويين عند البشر والشمبانزي». كان أحد المستويين يتعلق بالجينات، والآخر بالآليات التي تتحكم في متى وأين تنشط الجينات. لا تكمن الاختلافات الرئيسة بين البشر والشمبانزي في بنية جيناتهم وبروتيناتهم، بل في المفاتيح التي تتحكم في كيفية أدائها لوظائفها في أثناء النُّمو. وبهذه الطريقة، تصبح الفجوة بين الكائنات التي تبدو مختلفة مثل: البشر والشمبانزي، أو الديدان والأسماك، أصغر على المستوى الجيني. إذا كان هناك بروتين يتحكم في توقيت أو نمط عملية النُّمو، فإن التغييرات في متى وأين ينشط هذا البروتين يمكن أن يكون لها تأثيرات كبيرة في أجسام البالغين.

يمكن للتغييرات في المفاتيح التي تتحكم في نشاط الجينات أن تؤثر في الأجنّة والتطور من مناحي. على سبيل المثال: إذا عملت البروتينات التي تتحكم في نمو الدماغ مدة أطول أو في أماكن مختلفة، فقد تكون النتيجة أدمغة أكبر وأكثر تعقيدًا.

إن التعديل في نشاط الجينات يمكن أن يؤدي إلى ظهور أنواع جديدة من: الخلايا، والأنسجة، والأجسام، كما سنرى.

المزيد من القراءة:

سعى زوكركاندل وبولينج إلى ما هو أكثر من مجرد الكشف عن العلاقات بين الأنواع. واقترحا استخدام الاختلافات في البروتينات والجينات كساعة من نوعٍ ما لمعرفة المدة التي تطورت فيها الأنواع بشكلٍ مستقل عن بعضها. إذا كانت معدلات التغير في تسلسل البروتين ثابتة نسبيًّا على مدى فترات طويلة، فإن الاختلافات في البروتينات تحمل وسيلة لتفسير الوقت.

تقول فرضية الساعة الجزيئية أن التغيرات في تسلسل الأحماض الأمينية في البروتين ستكون ثابتة على مدى فترات طويلة من الزمن. تعتمد إحدى طرق تطبيق هذا المفهوم على فهم تسلسل الأحماض الأمينية. ولنأخذ مثالًا افتراضيًّا تمامًا، نقارن فيه بين نوع من: الضفادع، والقردة، والإنسان. سنبدأ بسَلسَلة البروتينات. ثم نحسب عدد الأحماض الأمينية التي تختلف بين كل نوع. ولنفترض أننا ننظر إلى بروتين موجود في الجلد، وأن بروتين الضفدع يختلف عن كل من الإنسان والقرد بثمانين حمضًا أمينيًّا. في حين يختلف البشر والقرود في ثلاثين فقط. لتشغيل الساعة الجزيئية، سنحتاج إلى تاريخ أحفوري محدد لتحديد معدل تغير الأحماض الأمينية، ومن ثم يمكننا تطبيق هذا المعدل، حيث لا توجد حفريّات.

لنفترض أن لدينا حفريّة تشير إلى أن: الضفادع، والقردة، والبشر

كانوا يشتركون في سلف مشترك قبل 400 مليون سنة. لمعايرة الساعة، سنقسم 80 على 400؛ لنحصل على معدل تغير للبروتين يساوي 0.2٪ على مدى مليون سنة. وبهذا الرقم، يمكننا بعد ذلك حساب المدة التي مضت منذ أن تقاسم البشر والقردة سلفًا مشتركًا عن طريق ضرب 0.2 في 30، لنحصل على ستة ملايين سنة. هذا المثال افتراضي، لكنه يوضح كيف يمكننا أولًا سَلسَلة البروتينات، وحساب اختلافات الأحماض الأمينية فيما بينها، واستخدام الحفريّات لتقدير معدل تغير البروتين، ثم تطبيق هذا المعدل لفهم عمر الأحداث التي لا نملك لها حفريّات.

قصة محاولة زوكيركاندل وبولينج لكتابة ورقة بحثية جريئة، فضلًا عن السياق التاريخي العام لعملهما موجودة في:

G. Morgan, "Émile Zuckerkandl, Linus Pauling, and the Molecular Evolutionary Clock," Journal of the History of Biology 31 (1998): 155—78.

والورقة البحثية التي أنتجاها هي:

E. Zuckerkandl and L. Pauling, "Molecular Disease, Evolution and Genic Heterogeneity," 189—225, in Michael Kasha and Bernard Pullman, eds., Horizons in Biochemistry: Albert Szent-Györgyi Dedicatory Volume (New York: Academic Press, 1962).

للاطلاع على تاريخ شفهي مع إميل زوكيركاندل، راجع: "الساعة الجزيئية":

"The Molecular Clock,"
https://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/evolution/public/clock/ zuckerkandl.html.

تبع آلان ويلسون وماري كلير كينج هذا النهج في عملهما. وكانا في الأصل يتابعان ورقة بحثية مهمة ومثيرة للجدل حول الساعة

الجزيئية تشير إلى أن البشر والشمبانزي لديهما أصل مشترك حديث نسبيًّا. تلك الورقة هي:

A. Wilson and V. Sarich, "A Molecular Time Scale for Human Evolution," .Proceedings of the National Academy of Sciences 63 (1969): 1088—93

وكان هدفهما إضافة المزيد من البروتينات إلى هذا التحليل لمعايرة تلك الساعة بشكلٍ أكثر دقة. وورقة كينج المهمة هي: «التطور على مستويين في البشر والشمبانزي»:

M. C. King and A. C. Wilson, "Evolution at Two Levels in Humans and Chimpanzees," Science 188 (1975): 107—16.

المستويان اللذان أشارا إليهما كانا التطور على مستوى ترميز البروتين والتطور على مستوى تنظيم الجينات، أي: المفاتيح. وتشير بياناتهما إلى أن العديد من الاختلافات بين البشر والشمبانزي ترجع إلى الاختلافات في متى وأين تنشط الجينات، وبالتالي، في تنظيم الجينات.

جاءت المزيد من التأكيدات الحديثة لعملهم في:

"Tiny Genetic Differences Between Humans and Other Primates Pervade the Genome," Scientific American, September 1, 2014; and K. Prüfer et al., "The Bonobo Genome Compared with Chimpanzee and Human Genomes," Nature 486 (2012): 527—31.



الفصل الرابع

مسوخ جميلة

تظهر المسوخ بشكلٍ لافت في التكهنات التي تدور حول أسلوب عمل الطبيعة، ففي القرون التي سبقت داروين، كان لكلمة «مسخ» معنى شبه تِقني. إذ وضع فلاسفة الطبيعة وعلماء التَّشريح تصنيفات لوصف: الماعز ذات الرأسين، والضفادع متعددة الأرجل، والتوائم الملتصقة. وفي القرن السادس عشر، اعتقد الكثيرون أن هذه التشوهات جاءت نتيجة لكثرة المنيّ في أثناء الحمل، أو بسبب شرود أفكار المرأة الحامل.

ظهر علم جديد في القرن الثامن عشر عندما قدّر عالم التَّشريح الألماني صامويل توماس فون سومرينج (1755-1830) أن المسوخ تأتي من تغيّرات في النُّمو الطبيعي وليس لأسباب خُرافية. لقد كانت، على حدٍّ تعبيره: «اضطرابات في القوة التخليقية». وفي الصفحة الأولى من دراسته حول هذا الموضوع عام 1791، عرض رسومًا لرؤوس بشرية مزدوجة: أطفال ميتين برأسين كاملين تنبتان من الرقبة، وآخرون بوجوه مزدوجة فقط. وفي رأيه، تمثل كل حالة تغيّرًا في النُّمو الطبيعي في مراحل مختلفة. ظهرت الرؤوس المزدوجة الكاملة نتيجة اضطرابات في المراحل المبكرة من النُّمو، في حين

نشأت الوجوه المندمجة بشكلٍ غير كامل من المراحل اللاحقة.[53]

بعد بضعة عقود، اقترح جيفروي سانت هيلير أن **المسوخ**، وهو مصطلح استخدمه كثيرًا، يعكس قدرة الخفية للمخلوقات على التحول إلى مخلوقات أخرى. وبعد رحلته مع نابليون في مصر ورؤيته للأسماك ذات الرئة (انظر الفصل الأول)، أمضى سانت هيلير أيامه في محاولة تحوير بيض الدجاج، وإضافة مواد كيميائية مختلفة لإعاقة نموه. كان يعتقد أنه إذا أضاف التركيبة الصحيحة من المواد الكيميائية إلى الأجنّة النامية، سيتمكن من تغيير مخلوق إلى آخر. عملًا بفكرة مبكرة مفادها: إن الدجاج يمر بمرحلة سمكية في تطوره الطبيعي، عمل سانت هيلير لعقود من الزمن في محاولة لجعل بيض الدجاج ينتج فراخ السَّمك. وقد باءت تلك المحاولات بالفشل، لكن ابنه إيزيدور حمل الراية ووضع أطروحة من ثلاثة مجلدات عن التشوهات الخلقية لا تزال مستخدمة حتى اليوم. طور

(53) كان توماس سومرينج عالمًا موسوعيًا، وصف واحدة من أولى: الزواحف الطائرة، والتيروصورات. وصمم التلسكوبات، وطور اللقاحات، وحلل الطفرات. بحثه الكلاسيكي حول تشوهات النُمو هو:

S. T. von Soemmerring, Abbildungen und Beschreibungen einiger Misgeburten die sich ehemals auf dem anatomischen Theater zu Cassel befanden (Mainz: kurfürstl. privilegirte Universitätsbuchhandlung, 1791).

إحدى الأوراق المؤثرة حول كيف يمكن للمسوخ - تشوهات النُمو - أن تكون غنية بالمعلومات هي:

P. Alberch, "The Logic of Monsters: Evidence for Internal Constraint in Development and Evolution," Geobios 22 (1989): 21–57.

للاطلاع على تفسيرات كلاسيكية لتشوهات النُمو وعلم المسوخ والتشوهات، انظر:

Dudley Wilson, Signs and Portents: Monstrous Births from the Middle Ages to the Enlightenment (New York: Routledge, 1993).

إيزيدور تصنيفًا لتشوهات الولادة، حيث صنفها حسب: النوع، والعضو المصاب، ودرجة التأثيرات التَّشريحية. على سبيل المثال: درس التوائم الملتصقة، وصنفها وفق عدد الأعضاء المعنية ومدى تشابك أنظمتها التَّشريحية. كان هذا العمل بمثابة الأساس للباحثين اللاحقين لتقييم الآليات البيولوجية، بدلًا من الأسباب الخارقة للطبيعة الداخلة في إنتاج الحالات الشاذة.[54]

عندما نشر كتابه: «أصل الأنواع»، أحدث داروين تحولًا في دراسة تشوهات النُّمو. وإذا كان محرك التطور هو الانتخاب الطبيعي، بالنسبة لداروين، فإن التباين بين الأفراد هو وقوده. إذا كان الأفراد في نوعٍ ما يتباينون في سمات تختلف في شكلها ووظيفتها، وبعض هذه السمات تعزز نجاح هؤلاء الأفراد في بيئة محددة، فمع مرور الوقت يجب أن تتزايد أعداد تلك المخلوقات والصفات. وإذا كانت السمة ضارة، فسوف تتضاءل مع مرور الوقت. إن جوهر التطور هو التباين بين الأفراد. إذا كان جميع الأفراد في مجتمعٍ ما متشابهين تمامًا، فإن التطور عن طريق الانتخاب الطبيعي لا يمكن أن يحدث أبدًا.

---

(54) حول المساهمة الخالدة لجيفري وإيزيدور سانت هيلير في فهم تشوهات النُّمو، انظر:

A. Morin, "Teratology from Geoffroy Saint Hilaire to the Present," Bulletin de l'Association des anatomistes (Nancy) 80 (1996): 17–31 (بالفرنسية).

للاطلاع على موقع مفيد حول تاريخ وتأثير دراسات علم المسوخ والتشوهات في علم الأحياء والطب، راجع:

A New Era: The Birth of a Modern Definition of Teratology in the Early "19th Century," New York Academy of Medicine,

https://nyam.org/library/collections-andresources/digital-collections exhibits/digital-telling-wonders/new-era-birth-moderndefinition /teratology-early-19th-century.

إنَّ الاختلافات بين الأفراد هي المادة الخام التطورية للانتخاب الطبيعي، كلما زاد التباين، كان عمل التطور أسرع. وفي وجود قدر كبير من التباين، بما في ذلك التباين الذي تكشفه المسوخ، عندها فقط يمكن للانتخاب الطبيعي أن يؤدي إلى تغييرات كبيرة مع مرور الوقت.

كان ويليام بيتسون (1861–1926) أحد أبطال دراسة التباين بعد داروين. ومثل داروين، نشأ بيتسون وهو مشغوف بالتاريخ الطبيعي. وعندما سُئل وهو يافع عما يريد أن يصبح، أجاب: إنه يريد أن يصبح عالم طبيعة، ولكن إذا لم يكن لديه القدر الكافي من الكفاءة، فسوف يصبح طبيبًا. التحق بيتسون بجامعة كامبريدج عام 1878 كطالب عادي. لكن كتاب داروين حول أصل الأنواع كان له تأثير عميق في الشاب بيتسون. وقد أصبح متحمسًا لفهم كيفية عمل الانتخاب الطبيعي. وبالنسبة له، كانت الإجابات تكمن في فهم كيفية تباين الأنواع: ما الآليات التي تجعل الكائنات تبدو مختلفة عن بعضها؟ ومن خلال قراءة أعمال جريجور مندل الذي اكتشف مبادئ الوراثة في نباتات البازلاء، جاء بيتسون الإلهام: الاختلاف الذي ينتقل من جيل إلى جيل هو جوهر التطور. ترجم بيتسون أعمال مندل إلى اللغة الإنكليزية، واخترع مصطلحًا جديدًا لوصفه: علم الوراثة[55] genetics المشتق من الكلمة اليونانية Genesis الذي يعني: «**الأصل**».

أراد بيتسون، مثل جيفروي سان هيلير من قبله، تصنيف طرق

(55) أو علم الجينات في المفهوم الحديث. (المترجم).

اختلاف الأنواع والأفراد. لكن بيتسون كانت لديه ميزة إضافية، حيث كان متسلحًا بأفكار جديدة من مجال علم الوراثة المتنامي، فبحث عن الطرق التي يمكن أن يؤثر بها التباين بين الأفراد في كيفية عمل التطور.

كرّس بيتسون ما يقارب عقدًا لهذه الدراسة، وأنتج كتابًا ضخمًا بعنوان: «أدوات لدراسة التباين» في عام 1894. يحتوي الكتاب خريطة لكيفية اختلاف المخلوقات عن بعضها والبحث عن القواعد العامة التي تكمن وراء إنتاج التباين، وفي النهاية تؤدي إلى التطور. وبعد تقييمه لأكبر عددٍ ممكن من الأنواع، وصف نمطين مختلفين للتباين. أحد هذه الأنماط هو الاختلاف في حجم الأعضاء أو درجتها، وهو الذي يمثل سلسلة متصلة من الأصغر إلى الأكبر. على سبيل المثال: لدى الفئران اختلافات في أطوال: أطرافها، أو ذيولها، أو أعضائها الأخرى. ويمكن قياس هذا النوع من التباين بسهولة عن طريق قياس: الطول، أو العرض، أو الحجم. أمّا النوع الآخر من التباين، فهو أكثر دراماتيكية، ويتمثل في وجود التراكيب أو عدم وجودها. ومن الأمثلة على ذلك العَنش في قطط همنجواي.

الأفراد الطبيعيون لديهم خمسة أصابع، في حين أنَّ المصابين بالعَنش لديهم ستة أو أكثر.

تختلف هذه القطط عن القطط العادية في عدد أصابع أقدامها، وليس في طول عظامها على سبيل المثال. وهذا النوع من التباين يكون بالنوع، وليس بالدرجة أو الحجم.

أصبح البحث عن كائنات ذات أعضاء إضافية شغفًا لبيتسون.

وقد أذهلته غرائب الطبيعة - الأعضاء الإضافية أو الأعضاء الموجودة في المكان الخطأ، مثل: النحل الذي يملك أرجلًا في المكان الذي يجب أن تكون فيه قرون استشعار، أو البشر الذين يملكون أضلعًا إضافية، أو الحلمات الإضافية في الذكور. وفي هذه الحالات، كان الأمر أشبه بما لو أن الأعضاء تُقص من مكانٍ ما في الجسم وتُلصق في مكانٍ آخر. يمكن استنساخ عضو مكتمل النُّمو بالكلية أو نقله إلى أماكن مختلفة في الجسم. كان ثمة لغز في تلك المسوخ، وحله قد يكشف عن قواعد عامة حول كيفية بناء الأجسام وتطورها.[56]

كان فلاسفة الطبيعة منذ القرن السادس عشر وبعده على حق في وجهة نظرهم بأن المسوخ تكشف شيئًا جوهريًّا فيما يتعلق بعالم الأحياء. وما كان مطلوبًا هو النوع الصحيح من المسوخ والأدوات العلمية لفهمه.

الذبابة:

كان أحد أعظم القرارات في تاريخ علم الأحياء هو قرار توماس هنت مورجان (1866-1945) دراسة الذباب.

بدأ مورجان حياته المهنية بدراسة جوز البحر sea acorns والديدان والضفادع مقتنعًا بأن خلاياها وأجنتها تحتوي أدلة تشير إلى بيولوجيتنا. وهو لم يخترها بناءً على حدس باطني أو عشوائيًّا. بل ركز على الكائنات المائية الصغيرة التي يمكنها إعادة بناء أجزاء من

(56) بحث ويليام بيتسون الكلاسيكي حول التباين هو:

Materials for the Study of Variation Treated with Especial Regard to Discontinuity in the Origin of Species (London: Macmillan, 1894).

جسمها بالكامل بعد فقدانها. الديدان المستورقة Planarian، على سبيل المثال: هي أبطال في التجدد: إذا شققتها إلى نصفين، وتركتها تنمو من جديد، ستكون النتيجة النهائية فردين كاملين. ويمكن للعديد من الكائنات – مثل: الديدان، والأسماك، والبرمائيات – إعادة بناء أجسامها بعد الإصابات. وينبغي علينا أن نشعر بالغيرة من أبناء عمومتنا من الحيوانات، ففي مرحلةٍ ما على طول خطنا التطوري، فقدت الثدييات هذه القدرة.

دخل مورجان مجال العلم في وقت كان فيه الكثير مما نعدّه بدهيًا اليوم غير معروف إطلاقًا. اكتشف الراهب التشيكي جريجور مندل أن السمات يمكن أن تنتقل من جيلٍ إلى جيل، ولكن مصدر تلك الوراثة كان لغزًا. لقد رأى النَّاس الخلايا، لكن فكرة أن الكروموسومات تلعب دورًا في هذه العملية لم تكن معروفة، ناهيك عن وجود الحمض النووي.

في العلم الذي جاء به مورجان كان يوجد ضمنًا تحول أساسي في التفكير في الحياة، وهو الأمر الذي تؤيده تقريبًا كل أبحاث الطب الحيوي اليوم، فالمخلوقات المتنوعة، من الديدان إلى نجم البحر، يمكنها تقديم رؤىً حول الآليات العامة للبيولوجيا البشرية. كان عمله محكومًا بالاعتراف الضمني بأن جميع الكائنات على هذا الكوكب تتشارك روابطَ عميقة.

بعد بضع سنوات من إجراء تجارب على التجدد، وبعد أن وصفها في كتابه المؤثر: «**التجدد**» الذي نُشر عام 1901، أدرك مورجان أن الأدوات التي يحتاجها لتحقيق تقدم كبير ببساطة لم تكن موجودة.

ويبدأ البحث عن برنامج بحثي جديد. في قلب كل ذلك، من التجدد إلى التَّشريح، تكمن الوراثة، أي: نقل المعلومات من جيلٍ إلى جيل. ومعرفة ما يحرك الوراثة سيكون مفتاحًا لكشف العديد من أسرار علم الأحياء. كان مورجان مقتنعًا بأن الفهم العميق لعلم الوراثة سيأتي من العثور على كائن يتكاثر وينمو بسرعة، ويكون صغيرًا، ويمكن تربيته بأعداد كبيرة في المختبر. لقد أراد نوعًا مثاليًّا يمكن رؤية كروموسوماته بالمجهر، الكروموسومات التي اقتُرِح في ذلك الوقت، ولكن لمَّا يَثبت بعد أنها تحتوي المادة الوراثية. كانت تلك قائمة متطلبات طويلة جدًّا، وهي قائمة خرج منها المخلوق الذي أراد أن يفهمه بشده: البشر.

ولم يكن مورجان يعلم في ذلك الوقت أن أحد خبراء تصنيف الحشرات كان في مهمة مماثلة، وإن كان من الطرف الآخر من المشكلة. تشارلز دبليو وودوورث (1865–1940)، من جامعة كاليفورنيا في بيركلي، جعل مهمة حياته الكشف عن التفاصيل الغامضة لتشريح الحشرات، مع التركيز على تصنيف الذباب والحشرات الأخرى. وقد جعله هذا البحث خبيرًا في بيولوجيا الذباب، إلى حد أنه أصبح مقتنعًا أن أحد أنواعها، وهو ذبابة الفاكهة، دروسوفيلا ميلانوجاستر، يمكن أن يمثل نموذجًا تجريبيًّا. وفي وقتٍ ما من بدايات القرن العشرين (السنة غير معروفة بالتحديد)، تواصل مع ويليام إي كاسل (1867–1962)، وهو عالم الأحياء في جامعة هارفارد، واقترح عليه إجراء بعض التجارب على ذباب الفاكهة.

ومثل بيتسون، كان كاسل مهتمًا بالكشف عن آليات الوراثة والتنوع. في ذلك الوقت، كان كاسل يعمل على خنازير غينيا لفهم كيفية انتقال ألوان فرائها وأنماط أجسامها من جيلٍ إلى جيل. لكن خنازير غينيا كانت مثبِّطة؛ لأن الإناث تلد ثمانية صغار على الأكثر وتستغرق شهرين تقريبًا في الحمل. ولدراسة أنماط الوراثة، كان على كاسل أن ينتظر شهورًا حتى تتكاثر لأجيال متعددة. كان اقتراح وودورث بالعمل على الذباب جذابًا بشكلٍ واضح، إذ تعيش ذبابة الفاكهة في المتوسط لمدة تتراوح بين أربعين إلى خمسين يومًا، وخلال هذه الفترة يمكن للأنثى إنتاج آلاف الأجنّة. أدرك كاسل أنه يستطيع إجراء تجارب على الوراثة في شهرٍ واحد باستخدام الذباب أكثر مما يستطيع إجراءه في سنوات على خنازير غينيا.

تحول كاسل إلى العمل على الذباب ووضع أساليب لإنسالها وتربيتها. ونشر ورقة بحثية عن تجارب الذباب في عام 1903 التي حظيت بالشهرة ليس بسبب نتائجها العلمية بقدر تأثيرها في المجتمع العلمي. رأى علماء آخرون، بما في ذلك مورجان، الجمال والقوة في دراسة الذباب.

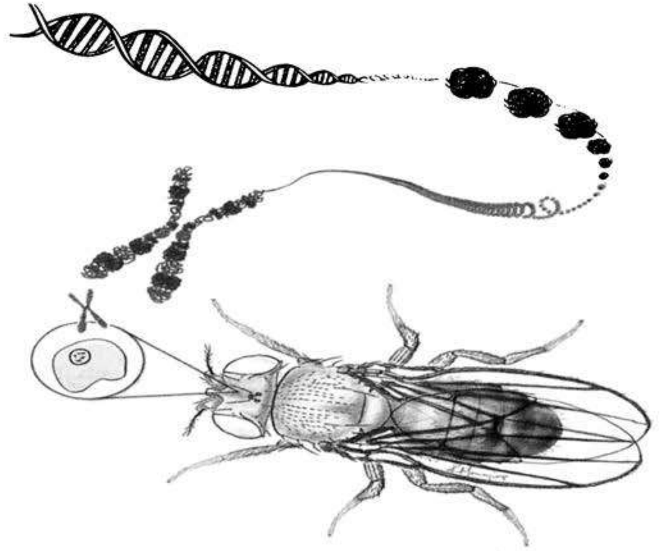
تبدو ذبابة الفاكهة مرشحًا غير محتملٍ للاكتشافات الرائدة، إذ يبلغ طولها حوالي ثلاثة ملليمترات، وتعيش على الفاكهة المتعفنة. يجدها معظمنا حول القمامة على شكل ذباب صغير غير قارص يزعجنا بالتحويم حولنا. لكن ما يجعلها من الهوام يجعلها ذات أهمية للعلم.

جاء بحث مورجان على غرار تقاليد بحث المسوخ، وهو ما يعني

العثور على الطافرات وتحليلها. الطافرات هي مفاتيح لفهم عمل الجينات الطبيعية. تعكس الطافرة التي ليس لها عيون خللًا في جين واحد أو أكثر يتحكم في تكوين العين. وبهذه الطريقة، تصبح الطافرات بمثابة نجوم هادية يمكن استخدامها لتحديد الجينات المشاركة في تشكل الأعضاء المختلفة؛ ونظرًا لأن الطافرات نادرة، كان مورجان بحاجة إلى تربية الآلاف من الذباب لإيجاد طافرة واحدة. ربى هو وفريقه مئات من مستعمرات إنسال الذباب، وفحصوا كل ذبابة تحت المجهر للبحث عن أي شذوذ.

ما لا يعرفه معظمنا هو أن جسم الذبابة الذي يظهر تحت المجهر معقّد بشكلٍ جميل. عند النظر إليها بقوة التكبير المتوسطة، يظهر عالم كامل من: الشعيرات، والأشواك، والزوائد من أجزاء الجسم. أصبح فريق مورجان على دراية بهذا التعقيد، إلى درجة أن أي تغيير، مهما كان صغيرًا، كان بمثابة مادة لتحليل الطفرات الجديدة. وقد أمضوا الساعات الطوال منحنين فوق المجاهر؛ بحثًا عن ذبابة بأي سمة غريبة، ربما أجنحة ذات أشكال مختلفة، أو أنماط خطوط جديدة، أو أطراف متغيرة.

وكما نعلم الآن، فالجينات هي تسلسلات من الحمض النووي محزومة بإحكام لتشكل الكروموسومات. تقع الكروموسومات داخل نواة الخلية، وفي ظل الظروف المناسبة، يمكن رؤيتها تحت المجهر. لم يكن مورجان يعرف شيئًا عن الحمض النووي، لكنه كان يستطيع رؤية الكروموسومات، وقد أصبحت نافذته على الجينات.

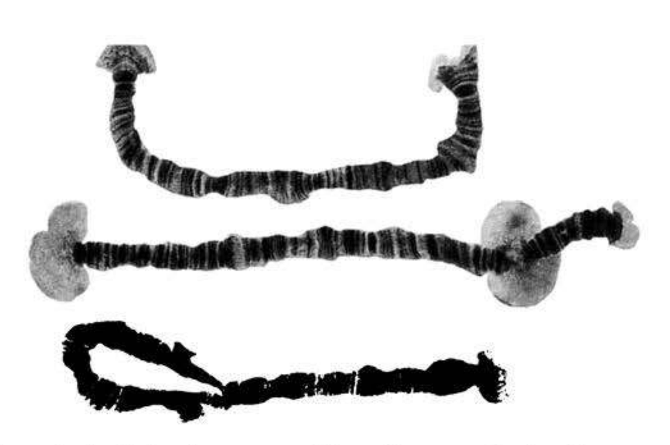


الجينات عبارة عن أجزاء من الحمض النووي ملفوفة ومضغوطة بإحكام في الكروموسومات الموجودة داخل نواة الخلية. لاحظ طريقة حزم الكروموسومات.

ابتكر مورجان طرقًا بارعة لمحاولة ربط تشريح الطافرات بمادتها الوراثية. ووجد فريقه أن الذباب لديه كروموسومات عملاقة داخل الغدد اللعابية، وقد كشفت إزالتها، ومعالجتها بصبغة حمراء حصلوا عليها من أشنة برية عن سلسلة من الخطوط البيضاء والسوداء على الكروموسوم، بعضها سميك، والبعض الآخر دقيق. ثم رسم مورجان خريطة لأنماط الخطوط البيضاء والسوداء في كل من الذباب العادي والذباب الذي به طفرات. ومن خلال مقارنة الاختلافات في الخطوط، تمكن من رؤية الموقع على الكروموسوم الذي اختلف فيه الاثنان، مما يكشف في الأساس عن مكان وجرد

التغيّر الجيني الذي أحدث الطفرة.

كان الذباب يتغذى على الموز الفاسد، فملأت معمل مورجان رائحة القمامة. وكان العمل هناك يعني قضاء ساعات في التحديق في المجهر. وبسبب هذه الظروف، كان النجاح في مجموعة مورجان يحتاج إلى نوع مميز من الأشخاص، شخص يمكنه، فوق كل شيء، مواصلة التركيز على: أجسام الذباب، وخطوط الكروموسومات، والطفرات. وما كان على المحك هو أحد أكبر أسئلة الحياة: كيف تنتقل المعلومات من جيل إلى جيل؟



كروموسومات هاموش بروب بولشر prope pulcher تظهر عليها خطوط سوداء وبيضاء

كان مختبر مورجان في البداية في مكان ضيق في جامعة كولومبيا، حيث خُزنت سلالات الذباب لتربيتها وتحليلها تحت المجهر. كان المختبر، المعروف باسم غرفة الذباب، يضم نخبة من علماء الأحياء في أوائل القرن العشرين، حيث جذب مورجان بعضًا من أفضل

وأذكى علماء الأحياء إلى مختبره. وبعد أربعة عشر عامًا في جامعة كولومبيا، نقل العملية بأكملها إلى معهد كاليفورنيا للتقنيّة في عام 1928، وفاز بجائزة نوبل في عام 1933.[57]

كانت لدى أحد طلاب مورجان الأوائل قدرة أسطورية على العمل مع الذباب، فلم يكن كالفن بريدجز (1889-1938) أفضل من يميز الذباب الطافر فحسب، بل كان يتمتع أيضًا بالصبر الذي مكّنه من الجلوس لساعات للعثور عليه، كما لاحظ بريدجز اختلافات صغيرة بين الذباب كانت غير مرئية للآخرين. وأحضر أيضًا تطورات تقنية: فقد أدى التحول إلى المجهر ذي العدستين إلى توسيع نطاق رؤيته، وأدى إلى اكتشاف أن الذباب يتغذى بشكلٍ جيد على الأجار. كان هذا الاكتشاف الأخير بمثابة تغيير مهم في المختبر، حيث لم تعد رائحة غرفة الذباب تشبه رائحة الموز الفاسد.

كان بريدجز صاحب الجُمة الكثيفة من الشعر المنتصب الذي يبدو أنه يتحدى قوانين الفيزياء، كان روحًا مضطربة. عندما لم يكن يعمل لساعات طويلة في المختبر، كان كثيرًا ما يختفي فترات طويلة. عاد مرة بصور لسيارة جديدة صممها. كما كثرت الشائعات عن تجاربه الغرامية، ولم يكن مورجان راضيًا على حياته الخاصة. كان الحديث حول علاقاته يعني أن بريدجز لن يترقى أبدًا إلى منصب

(57) كتب أحد طلاب تي إتش مورجان السابقين، وهو بنفسه عالم بارز، سيرته التذكارية للأكاديمية الوطنية للعلوم:

A. H. Sturtevant, Thomas Hunt Morgan, 1866– 1945: A Biographical Memoir (Washington, DC: National Academy of Sciences, 1959), available online at http://www.nasonline.org/publications/biographical .memoirs/memoirpdfs/morgan-thomas-hunt.pdf

عضو هيئة تدريس في معهد كاليفورنيا للتقنيّة. وعندما توفي في الأربعينيات من عمره، كان الخبر المنتشر في المختبر أنه قُتل على يد زوج عاشقة غيور. ومن المؤسف أن الحقيقة كانت على نفس القدر من المأساوية. طلب أحد زملائي في علم الوراثة مؤخرًا من شقيقه، وهو نائب عام في لوس آنجلوس البحث عن شهادة وفاة بريدجز. مات بريدجز من مضاعفات مرض الزهري.



كالفن بريدجز وشعره

وفيما يتعلق بالعالم من حولهم، التزم المختبر بالصمت التام بشأن سلوك بريدجز الشخصي. لكن كان له تأثير كبير في عمل مورجان لدرجة أن مورجان تقاسم جائزة نوبل التي حصل عليها مع عائلة بريدجز بعد وفاته المفاجِئة.[58]

---

(58) كان كالفن بريدجز موضوعًا لفيلم سيرة ذاتية في عام 2014، The Fly Room. للاطلاع على تقييمه:

وفي حين كان بريدجز معروفًا بقدرته على اكتشاف الذباب الطافر الذي كانت به اختلافات طفيفة في: اللون، أو شكل الجناح، أو نمط الشعر، فقد كان من السهل نسبيًّا ملاحظة أحد اكتشافاته الأكثر شهرة. بل من الصعب أن يفوت هذا الاختلاف أحد الهواة. والاسم، مزدوج الصدر Bithorax، يقول كل شيء، فبدلًا من قطعتين صدريتين بهما جناحان، كان لديها أربع، أي: تضاعفت منطقة كاملة من الجسم، بأجنحتها وكل شيء فيها.

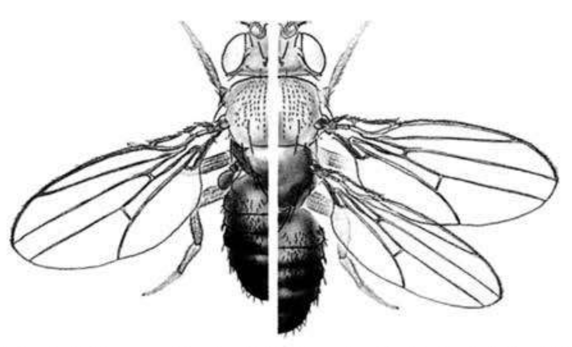
رسم بريدجز جسم الذبابة ووصف تشريحها، ثم فعل ما يفعله علماء الوراثة عندما يعثرون على طفرة: ربّى السلالة، وأبقى نسلها مستمرًا في مختبر الذباب في معهد كاليفورنيا للتقنيّة. لقد أنشأ مستعمرة من هذه الطافرات يمكن الحفاظ عليها إلى أجل غير مسمى.

أراد بريدجز العثور على الموقع الذي يُحتمل أن التغيّر حدث فيه في الكروموسوم. وباستخدام تقنية مورجان في صبغ الكروموسومات اللعابية، تمكن من تحديد منطقة في الذبابة الطافرة ذات الجناحين كانت الخطوط فيها مختلفة عن تلك الموجودة في الذباب العادي. لقد حدثت طفرة الصدر المزدوج؛ بسبب تغير في منطقة واسعة من كروموسوم الذبابة.

Genetics: Genius on the Fly," Nature 516 (December 11, 2014) , online at "
.https://www.nature.com/articles/516169a

أنشأ مختبر كولد سبرينج هاربور موقعًا إلكترونيًّا مخصص للسيرة الذاتية لكالفين بريدجز:

Calvin Blackman Bridges, Unconventional Geneticist (1889–1938), at
http://library.cshl.edu/exhibits/bridges



ذبابة الفاكهة العادية على اليسار، وذبابة الصدر المزدوج الطافرة على اليمين

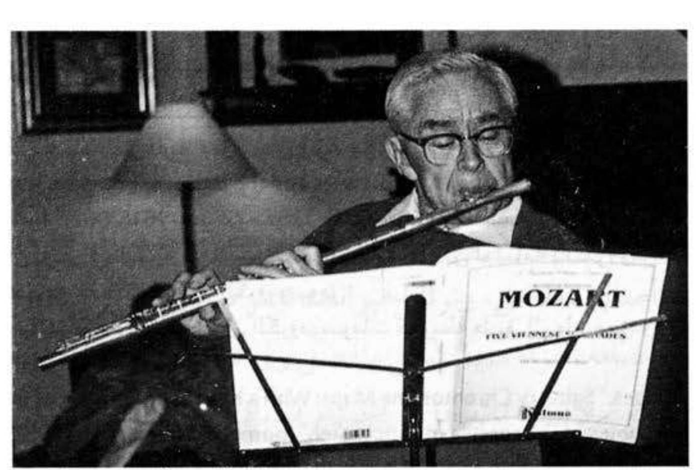
كانت مساعي مورجان وبريدجز لفهم سمة واحدة في الذباب مدخلًا لعالم جديد من التحديات والفرص، فقد بيّنوا هم وآخرون أن السمات المختلفة في الذباب قابلة للتوريث. تنتقل مادة بيولوجية ما من جيل إلى جيل وتخبر جنين الذبابة النامي أين يضع أجنحته في الجزء الصحيح من الجسم. كشفت طافرات بريدجز أن هذه المادة توجد على رقعة من كروموسومات الذبابة. ولكن ما تلك المادة التي تبني الأعضاء والأجسام، وكيف تمارس سحرها؟ هل بوسعها أن تخبرنا كيف تُبنى الأجسام وكيف تطورت على مدى ملايين السنين؟

لآلئ العقد:

اشتعل شغف إدوارد لويس (1918–2004) بالذباب عندما رأى إعلانًا في إحدى المجلات. وُلِد لويس في ويلكس بار، بنسلفانيا، وكان لديه فضول شديد دفعه إلى قضاء ساعات طوال في المكتبة القريبة. وعندما رأى إعلانًا عن ذباب الفاكهة، لفت انتباه نادي الأحياء في مدرسته الثانوية إلى الفكرة، فأنشأ النادي مستعمرة

للذباب، وبدأ لويس في العمل على الذباب.

التحق لويس بمعهد كاليفورنيا للتقنيّة في عام 1939، بعد عام من وفاة بريدجز، ليتعلم أدوات علم الوراثة التي كان العاملون في غرفة الذباب يتقنونها. كان رجلًا هادئًا ذا نظام يومي صارم للغاية، وكان يقضي الصباح الباكر في المختبر، ويمارس الرياضة في الساعة الثامنة، ثم يؤدي المزيد من العمل بمفرده، ويتناول الغداء بعد الظهر في نادي أعضاء هيئة التدريس الشهير في معهد كاليفورينا، الأثينيوم، ثم يعود إلى العمل ويعزف نايه الأثير حتى العشاء. كان يتمتع، مثل بريدجز، بقدرة جبّارة على الجلوس لساعات طويلة أمام المجهر يعمل على الذباب. وكان وقته المفضل، بكل المقاييس، هو هدوء المختبر بعد العَشاء. كان عمل لويس المتمثل في العثور على الذباب الطافر وتربيته شكلًا من أشكال التأمل.



إد لويس مع نايه في غرفة المعيشة في منزل أحد الأصدقاء

كان مخزن السلالات الذي حقق فيه بريدجز تقدمًا تقنيًا كبيرًا لا يزال يعمل ويضم طفرات الصدر المزدوج الشهيرة. وعندما بدأ لويس دراساته، كان قد سمع بطافرة الصدر المزدوج، وكان لديه أيضًا حدس حول بنيتها. وبما أن خريطة بريدجز أظهرت أن طفرة الصدر المزدوج تمتد على خطوط عدة على الكروموسوم، فقد اعتقد لويس أنها قد تكون جزءًا من منطقة لا تحتوي جينًا واحدًا فقط، بل على العديد من الجينات المشاركة في التطور.[59]

في سعيه لعزل المادة الوراثية التي أنتجت الجناح الإضافي، ابتكر لويس طريقة جديدة، ولكنها تستغرق وقتًا طويلًا لفحص طفرة الصدر المزدوج. وقد أمضى عقودًا في ذلك العمل، ولم ينشر ورقة علمية واحدة لأكثر من عشر سنوات كرس فيها نفسه لطفرة الصدر المزدوج.

كانت المقالة المؤلَّفة من ست صفحات التي ظهر عام 1978 ثورية بقدر ما كانت عصية على الفهم. إذ لفهمها بأكملها، لا بد من

(59) للاطلاع على تاريخ عمل لويس وبريدجز، انظر:

I. Duncan and G. Montgomery, "E. B. Lewis and the Bithorax Complex," pts. 1 and 2, Genetics 160 (2002): 1265–72, and 161(2002): 1–10.

كان لويس في البداية مهتمًا بتضاعف الجينات أكثر من اهتمامه بالنُّمو، ومن هنا جاء اهتمامه بهذه المنطقة من الكروموسوم.

وُصفت أنماط الخطوط على الكروموسومات كخريطة طريق إلى طفرة مزدوج الصدر والطفرات الأخرى في:

C. B. Bridges, "Salivary Chromosome Maps: With a Key to the Banding of the Chromosomes of Drosophila melanogaster," Journal of Heredity 26 (1935): 60–64; and C. B. Bridges and T. H. Morgan, The Third-Chromosome Group of Mutant Characters of Drosophila melanogaster (Washington, DC: Carnegie Institution, 1923).

قراءتها مرات عدة؛ لأنها مكتظة بالأفكار التي جاءت نتيجة سنوات من الحياة الهادئة مع الذباب.[60]

لقد طور لويس تقنية جديدة فعّالة، فكان يزيل مساحة كبيرة من كروموسوم الذبابة، ويترك الذبابة تنمو لرؤية التأثير في الجسم في الذباب الذي يفتقر إلى هذه المنطقة الكبيرة، ثم يضيف قطعًا صغيرة بالتتابع ليرى تلك التأثيرات في الجسم، وقد مكنه هذا النهج من تحديد ما يمكن أن تفعله الأجزاء المفردة من الكروموسوم بمعزلها.

يذكرني هذا النهج بنظامٍ غذائي يحظى بالشعبية طورًا ويختفي طورًا، يسمى: «التطهير». يصوم الناس أيامًا عدة، ثم يضيفون مجموعات غذائية مختلفة إلى نظامهم الغذائي بالتتابع وبالجمع بينها. ومن خلال الامتناع عن تناول الطعام تمامًا، ثم إضافة منتجات الألبان فقط لبضعة أيام، يتمكنون من معرفة كيف يؤثر: البيض، والحليب، والجبن في مستويات الطاقة والمزاج، على سبيل المثال. وبعد ذلك، من خلال الصيام وإضافة الأطعمة في توافيق مختلفة، يتمكنون من معرفة نتيجة الجمع، على سبيل المثال: بين الخُضر الورقية الداكنة ومنتجات الألبان. كان لويس يفعل الشيء ذاته مع المنطقة الكبيرة من الكروموسوم التي تضم طفرة الصدر المزدوج، فقد استأصلها بالكامل، وترك الحيوانات تنمو ليسجل الأثر الناتج، ثم أعاد إضافة أجزاء منها بشكل منفصل وفي توافيق مختلفة في أجنّة أخرى، مع ملاحظة تأثيرها في أجسام الذباب في أثناء تطوره إلى

(60) ورقة إدوارد لويس البحثية الكلاسيكية:

E. B. Lewis, "A Gene Complex Controlling Segmentation in Drosophila," Nature 276 (1978): 565–70

مرحلة البلوغ.

كشفت عملية القص واللصق الجينية التي أجراها لويس أن طفرة الصدر المزدوج لم تكن ناجمة عن جين واحد، بل عن مجموعة من الجينات. تنتظم الجينات في صف واحد على الكروموسوم، مثل: اللآلئ على العقد. وقد اعتقد أن هذه الجينات تعمل معًا لبناء الجنين، وأن لكل جين وظيفته الخاصة، لكن ذلك لم يكن الشيء الأكثر روعة.

يتألف جسم الذبابة من أجزاء من الأمام إلى الخلف: الرأس، والصدر، والبطن. يحمل كل جزء زائدة: قرون الاستشعار وأجزاء الفم على الرأس، والأجنحة على الصدر، والساقين والأشواك على البطن.

وجد لويس أنَّ كل جين في منطقة طفرة الصدر المزدوج يتحكم في جزء مختلف من جسم الذبابة، فيكوّن أحد الجينات قرون الاستشعار على الرأس، وآخر الأجنحة على الصدر، وثالث الأرجل على البطن. لعبت هذه الجينات دورًا في تشكيل بنية الجسم الأساسية. وهذا التنظيم من الأمام إلى الخلف كان مُرمَّزًا وراثيًّا الذي شكَّل مُفاجأة كبيرة للجميع أن بنية الجسم تتطابق مع موضع الجينات على الكروموسوم، فالجينات التي تنشط في تكوين الرأس تقع على أحد الطرفين التي تخص البطن على الطرف الآخر، والتي تخص الصدر في المنتصف، أي: إن تنظيم الجسم يطابق نشاط الجينات وبنيتها.

وفي حين أن النتائج التي توصل إليها لويس كانت مبهجة، فإن

جزءًا كبيرًا من البيولوجيا يشير إلى أنها قد تخص الذباب فقط. أحد الأسباب، أن أجزاء الذبابة تختلف عن أجزاء الحيوانات الأخرى، مثل: الأسماك، والفئران، والبشر. كما يفتقر الذباب إلى: العمود الفقري، والحبل الشوكي، والتراكيب الأخرى التي نراها في أجسام مثل أجسامنا، وتفتقر: الأسماك، والفئران، والبشر إلى: قرون الاستشعار، والأجنحة، والشعيرات.

وثمة فرق أكبر يتمثل في كيفية تطور الذبابة، حيث تمتلك معظم الحيوانات، في أثناء النُّمو، ملايين الخلايا المختلفة، ولكلٍّ منها نواته الخاصة. في حين يشبه جنين الذبابة خلية واحدة تحتوي العديد من النوى، مثل: كيس عملاق من المادة الوراثية. ولا يمكن تصور حيوان أغرب من الذبابة لمحاولة استخدامه لقول أي شيء عن كيفية نمو الحيوانات بشكلٍ عام وتطورها.

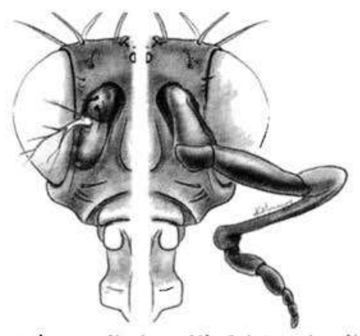
هريس المسوخ:

في عام 1978، عندما نُشرت ورقة لويس البحثية عن طفرة الصدر المزدوج، كان مجال علم الأحياء ينعم بثورة تقنيّة، ففي أيام مورجان، كانت الجينات بمثابة صندوق أسود - تمكن هو وفريقه من الربط بين تأثيرها في الجسم ومكانها على الكروموسوم، لكن لم يُعرف أي شيء تقريبًا عن كيفية عملها، ناهيك عن أنها مناطق من الحمض النووي.

وبحلول الثمانينيات، بعدما نشر لويس ورقته البحثية بسنوات قليلة، تمكن علماء الأحياء من سَلسَلة الجينات وأيضًا معرفة أين تُصنّع البروتينات بشكل فعال في الجسم. تمكن مايك ليفين وبيل

ماكجينيس اللذان كانا يعملان في مختبر الراحل والتر جيهرينج (1939-2014) في سويسرا، من الحصول على ذبابة طافرة، تنبت فيها ساقٌ من الرأس، في المكان الذي يوجد فيه قرن الاستشعار عادة. يتطور الرأس بشكل طبيعي باستثناء أن به ساقًا. مثل ذبابة بريدجز الطافرة ذات الأجنحة الإضافية، أو نواتج عمليات القص واللصق التي أجراها بيتسون، كانت هذه الطافرة إلى حد كبير أيضًا تخلط أجزاء الجسم، وكان العيب يخص قسم الرأس.

باستخدام تقنية الحمض النووي التي لم يكن من الممكن أن يتخيلها بريدجز، تمكن ليفين وماكجينيس من عزل الجين المسؤول عن الطفرة، ثم صنعا قطعة خاصة من الحمض النووي لاختبار مكان نشاط الجين في النُّمو. نتذكر هنا أنه عندما تكون الجينات نشطة، فإنها تصنع البروتينات. ولتصنيع البروتينات، تستخدم جزيئًا آخر، وهو الحمض النووي الريبوزي RNA، وسيطًا. ولاختبار المكان الذي تكون الجينات نشطة فيه، تحتاج إلى معرفة مكان تصنيع الحمض الريبوزي. لذلك ربط الاثنان صبغة بجزيء يمكنه العثور على الحمض الريبوزي أينما وُجد في جسم الذبابة. عندما حُقن هذا المزيج في جنين ذبابة في طور النُّمو، ذهبت الصبغة إلى الأماكن التي يعمل فيها الجين، وأصبحت الصبغة مرئية في الجنين تحت المجهر.



ذبابة عادية على اليسار، وذبابة طافرة على اليمين. سُميت بهوائية الساق Antennapedia لأنه نبت لها ساق، حيث يجب أن يكون قرن الاستشعار.

كان جين هوائية الساق الطافرة التي تنمو ساقها من رأسها، نشطًا بشكلٍ عادي، لكن في مكان محدد جدًّا في الرأس. علاوة على ذلك، كان الجين يتحكم في نوع العضو الذي يتشكل في الرأس، سواء أكان قرن استشعار أم كما في حالة الطفرة، ساقًا. إذا كان هذا الوضع يبدو مألوفًا، فذلك لأنه ما رآه إد لويس في عمله على كروموسومات طافرة الصدر المزدوج قبل سنوات. تذكر أنه رأى سلسلة من الجينات، واحدة تلو الأخرى على الكروموسوم، كل منها يختص بجزء واحد من الجسم، وكل منها يتحكم في العضو الذي ينمو هناك، وربما كان جين الرأس هذا بشيرًا باكتشافات قادمة، واحدًا من مجموعة الجينات التي تتحكم فيما يحدث في كل جزء من أجزاء جسم الذبابة.

أعادت النتائج ليفين إلى ورقة لويس المنشورة عام 1978، فبدأ دراسة طويلة لها، فقرأها، وأعاد قراءتها أكثر من خمسين مرة، لكنه مع ذلك، كما قال: «لم يفهمها تمامًا».

قادت ورقة لويس ليفين وماكجينيس إلى بحث أحد تنبؤاته الرئيسة، وهو: أنه يجب أن تكون هناك سلسلة من الجينات المتماثلة تقع جوار بعضها على الكروموسوم. وبعد عزل الجين، شرعا بعملية مطاردة لمعرفة ما إذا كانت هناك أي جينات أخرى مثله في مكانٍ قريب منه. كانت هذه التقنية بدائية: إذ طحنا أجساد الذباب حتى غدت عجينة، ثم عزلا الحمض النووي منها، ثم وضعا الخليط في مادة هلامية، ثم أضافا جينهما الطافر ممهورًا بصبغة. وكانت الفكرة هي أن الجين سيعمل مثل ورق صيد الحشرات اللاصق، لكن على المستوى الجزيئي، ويرتبط بكل جين له تسلسل مماثل. وستسمح لهم الصبغة بالعثور على هذه الجينات وعزلها.

وكانت النتيجة لا لبس فيها، حيث كان هناك العديد من الجينات الأخرى المشابهة له في الجينوم. ومن خلال سَلسلة كل واحد منها، وجد ليفين وماكجينيس أن الجينات المصبوغة جميعها تحتوي جزءًا صغيرًا من الحمض النووي بداخلها الذي كان متطابقًا تقريبًا. وفي مصادفة مذهلة، توصل مات سكوت، من جامعة إنديانا، إلى نفس الاكتشاف بشكل مستقل.[61]

ثم، وبعد معرفة تسلسل الجينات، أمكن للعلماء تطبيق نفس

---

(61) اكتُشفت متماثلات المحتوى في نفس الوقت بوساطة:
W. McGinnis et al., "A Conserved DNA Sequence in Homoeotic Genes of the Drosophila Antennapedia and Bithorax Complexes," Nature 308 (1984): 428–33; and by M. Scott and A. Weiner, "Structural Relationships Among Genes That Control Development: Sequence Homology Between the Antennapedia, Ultrabithorax, and Fushi Tarazu Loci of Drosophila," Proceedings of the National Academy of Sciences 81 (1984): 4115–19..

التقنيات على نطاق أوسع لمعرفة مكان نشاطها في جسم الذبابة في أثناء النُّمو ومكان وجودها على الكروموسوم. وباستخدام الحيل التي طبقوها على الطفرة التي كانت بداية كل شيء، وجد الباحثون من أنحاء العالم شيئًا جميلًا بشكلٍ غير متوقع، فكانت هذه الجينات تقع بجوار بعضها على الكروموسوم، وكل واحد منها ينشط في جزء مختلف من جسم الذبابة.

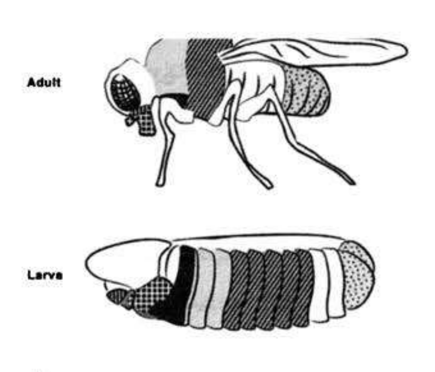
وفي وسط هذه الفَورة من التجارب، كان ليفين يتحدث مع أحد العلماء في مختبر آخر أشار إلى أن الذباب ليس الحيوان الوحيد الذي يملك جسما مقسمًا. ديدان الأرض هي في الأساس أنابيب ذات أقسام تشبه الكتل تمتد على طول الجسم. لماذا لا يدرسونها أيضًا؟ فربما كانت جيناتها ترمز إلى أقسامها أيضًا.

دفع هذا التعليق العابر ليفين وماكجينيس إلى الحديقة خلف المبنى الذي يعملان فيه لجمع كل كائن زاحف مقزز أمكنهما العثور عليه: الديدان، والحشرات، والهوام.

وبعد استخراج الحمض النووي لكل مخلوق، تحققا مما إذا كان يملك أيضًا جينات بتسلسل مماثل، وقد كانت تلك هي الحال. ولم يتوقفا عند هذا الحد، إذ ستكشف الأبحاث اللاحقة أن الحمض النووي للضفادع والفئران وحتى البشر يوجد به هذا التسلسل أيضًا.

كشفت الأبحاث اللاحقة على: الديدان، والذباب، والأسماك، والفئران عن حقائق كونية عن أجسام الحيوانات. ظهرت نسخ من جينات الذباب المسؤولة عن بناء الأجسام في كل الحيوانات تقريبًا،

من الديدان إلى البشر. وكانت كل تلك الجينات مثل الخرزات على الخيط جانب بعضها على الكروموسوم. وبدا أن كل جين ينشط في جزء محدد من الجسم: الرأس، والصدر، والبطن. فضلًا عن ذلك، وكما رأى لويس أول مرة، فإن موضع كل جين على الكروموسوم يطابق ترتيب الأقسام من الأمام إلى الخلف.



تنشط جينات هوكس التي تبدو مثل الخرزات على الخيط في أقسام أجسام الذباب والفئران.

وقد كانت الأوراق البحثية التي وصفت هذه الجينات ضمن الكومة التي أشعلت شغفي بعلم الوراثة والبيولوجيا الجزيئية منذ ما يقارب أربعة عقود.

وفي عام 1995، اعترفت لجنة جائزة نوبل بالفضل لإدوارد لويس الذي فتح عالمًا جديدًا في علم الأحياء. وعندما قَبِلَ الجائزة، كان متحفظًا كعادته. وفي خطاب قبول الجائزة قال: إن الجوائز لا تقارن مع حبه الأول: «الذباب وممارسة العلم».

إن عالم: الحشرات، والذباب، والديدان عبارة عن هريس من المخلوقات ذات أعداد مختلفة من الأقسام وأنواع مختلفة من الزوائد الناتئة منها.

تأمل الكركند تجد أن له قرون استشعار في المقدمة، تليها مخالب كبيرة، ومخالب صغيرة، وأرجل. تنبثق كل زائدة من هذه الزوائد من جزءٍ واحد من جسمه. في مئويات الأقدام، كل قسم من الجسم له ساق موازية تنبثق منه. والحشرات الطائرة لها أجنحة بدلًا من الأرجل في أجزاء محددة. ولدى البشر: فقرات، وأضلاع، وأطراف تقع على طول الجسم. وبفضل هذه الجينات، يمكن للعلماء الآن أن يطرحوا الأسئلة عن كيفية نمو البنية الأساسية وتطورها للجسم لدى الحيوانات.

حدد كالفن بريدجز المنطقة العامة من الكروموسومات التي تصنّع مجموعة إضافية من الأجنحة، وكشف إد لويس أن المنطقة تحتوي العديد من الجينات، كل منها ينشط في جزء محدد من الجسم، وأظهر ليفين وماكجينيس وسكوت أنَّ هذه الجينات قديمة جدًّا بين جميع الحيوانات. وقد كان ذلك بمثابة إلهام للجيل الجديد وهو مستعد لفهم كيفية عمل هذه الجينات.[62]

(62) هناك وصف كامل لاكتشاف متماثلات المحتوى وتأثيراتها في التطور، مع المراجع، في كتاب شون بي. كارول، أجمل الأشكال التي لا نهاية لها: العلم الجديد للنمو التطوري (نيويورك: نورتون، 2006). قيّم إد لويس المشكلة بأثر رجعي في:

E. B. Lewis, "Homeosis: The First 100 Years," Trends in Genetics 10 (1994): 341–43.

قص ولصق:

عندما كان أطفالي صغارًا يلعبون على شاطئ كيب كود، كانوا يجدون حيوانات صغيرة على شكل الجمبري في الرمال، ولما كانوا ينكزونها ويشاهدون ردة فعلها لقبوها بـ: «القافزات».

يبلغ طول هذه المخلوقات المعروفة أكثر باسم: «سكود أو براغيث الرمل»، حوالي نصف بوصة، ولها أجسام شفافة، وعادة ما تخفي نفسها في رمال الشاطئ. عند استثارتها، يمكنها قبض أجسامها والقفز قدمًا أو نحو ذلك في الهواء. والنوع المألوف على الشواطئ هو واحد فقط من ثمانية آلاف نوع معروف. تتمتع جميع هذه الأنواع بقدرة رائعة على الانتقال باستخدام مجموعة متنوعة من سلوكيات: السباحة، والحفر، والقفز. وهي تحقق ذلك باستخدام أرجل متعددة المهام كأنها سكين سويسرية افتراضية: بعضها كبير، والبعض الآخر صغير، وبعضها متجه للأمام، والبعض الآخر متجه للخلف. واسمها، مزدوجات الأرجل amphipod، هي كلمة يونانية تشير إلى وجود أرجل متجهة إلى الخلف والأمام: amphi تعني «مزدوج» وpod تعني «ساق».

عندما بدأ نيبام باتل مختبره المستقل في عام 1995 في شيكاجو، أراد العثور على حيوان مثالي لاستكشاف كيفية عمل الجينات في بناء الأجسام؛ ونظرًا لأن مزدوجات الأرجل لها أنواع عدة مختلفة من الأرجل، فقد كان لديه حدس أنها يمكن أن تمثل مخلوقًا ممتازًا لدراسة جينات لويس، فقد أمضى سنوات في البحث في الدِّراسات الألمانية من القرن التاسع عشر لمعرفة مزدوجات الأرجل الأنسب

التي يجب أن يعمل عليها في المختبر.

كان القرن التاسع عشر ذروة الرسم التَّشريحي والوصف، وقد خُصصت غرف كاملة من الأكوام في المكتبات للمجموعات المختلفة، وكان متسلحًا بأفكار استمدها من الأوصاف واللوحات الحجرية، طور باتل خطة تتناسب أيضًا بشكل جميل مع هوايته القديمة. مكتبة سُر مَن قرأ

عند زيارة منزل باتل في شيكاغو تجد حوض أسماك ضخمًا مليئًا بالمياه المالحة وسط غرفة معيشته. ولأنه كان من هواة الأحياء المائية المخلصين، فقد أعطته تجربته مع نظام الترشيح في الخزان الموجود في منزله فكرة. كان الحفاظ على نظافة النظام مشكلة دائمة، خاصة إبقاء المرشح خاليًا من اللافقاريات الصغيرة التي تتجمع وتنمو عليه. وقد لاحظ أنه وسط الأوساخ كانت هناك لافقاريات صغيرة تختبئ في القذر. من الواضح أنها أحبت الجزيئات المغذية التي تتدفق وتجعله منزلًا هانئًا لها.

منح ذلك باتل فكرةً، إذا كانت المخلوقات الصغيرة قد أحبت نظام الترشيح الصغير، فتخيل تنوع المخلوقات التي قد يجدها في الطين المرشح في خزانات المياه المالحة الضخمة في أحواض شيد Shedd في شيكاغو. كانت تلك الخزانات تحتوي: أسماك القرش، والورانك، وأكثر من خمسين نوعًا من الأسماك الكبيرة وحتى من حين لآخر دليلًا بشريًّا يرتدي معدات الغوص. أرسل باتل أحد طلاب الدِّراسات العليا ومعه دلو ليرى ما الذي يمكن أن يجده في نظام الترشيح. كان لديه حدس بأن الوحل سيؤوي حيوانات

صغيرة نشيطة يمكنه استخدامها في المختبر.

أثبتت المرشحات الموجودة في شيد أنها جنة لللافقاريات الصغيرة، فقد أمضى الطالب الذي أرسله باتل أيامه في تنظيف المرشحات، والنظر إلى الكائنات التي تعيش هناك تحت المجهر. وكان أحدها – وهو مزدوج أرجل يُعرف باسم بارهيال Parhyale – واعدًا للغاية كموضوع للبحث. لقد كان صغيرًا، ويتناسل بسرعة، وينمو إلى مرحلة البلوغ سريعًا. وكانت له أيضًا أنواع مختلفة عديدة من الزوائد. بدا كأنه الحيوان المثالي للتجارب. عمل باتل على تربيتها في المختبر والبدء في التجارب. استخدم مورجان الذباب لفهم آليات الوراثة، وكان باتل مصممًا على استخدام مزدوجات الأرجل لاستكشاف كيف تبني الجينات الأجسام.[63]

بعد فترة وجيزة من حصوله على البارهيال من شيد في شيكاجو، انتقل باتل إلى جامعة كاليفورنيا في بيركلي لإنشاء برنامج بحثي يتمحور حول هذه المخلوقات.

أثبتت جامعة بيركلي، وباتل، والبارهيال أنهم ثلاثي مبشّر؛ لأنه في بيركلي كانت تعمل جينيفر دودنا، وهي إحدى العلماء الذين اكتشفوا طريقة جديدة لتعديل الجينوم، وهي طريقة كريسبر– كاس

(63) أبحاث باتل على البارهيال موصوفة في:

A. Martin et al., "CRISPR/Cas9 Mutagenesis Reveals Versatile Roles of Hox Genes in Crustacean Limb Specification and Evolution," Current Biology 26 (2016): 14–26; and J. Serano et al., "Comprehensive Analysis of Hox Gene Expression in the Amphipod Crustacean Parhyale hawaiensis," Developmental Biology 409 (2016): 297–309

CRISPR-Cas. باستخدام هذه التقنية، يستطيع العلماء استهداف مناطق الجينوم بنوعين من الأدوات: مشرط جزيئي لقطع الحمض النووي، ودليل يأخذ المشرط إلى المكان الصحيح. في عام 2013، بيّنت دودنا وزملاؤها من أنحاء العالم أنه يمكن قطع الحمض النووي في الأنواع المختلفة وتعديله بدقة كبيرة. ويمكن استخدام مشرط كريسبر لاستئصال الجينات من الجينوم، ثم بتربية الأجنّة يمكن للعلماء رؤية آثار إزالة أحد جيناتها، كما شملت التجارب الأخرى الأكثر تعقيدًا استبدال تسلسل الجينات أو تعديله.

جاءت قوة هذه التقنيّة بفكرة لباتل: ماذا لو كان بإمكانك تعديل جينات البارهيال لجعل النشاط الجيني في أحد أجزاء الجسم يبدو مثل نشاط جزء آخر؟ هل يمكنك تغيير أماكن الأطراف وأجزاء الجسم؟

يملك البارهيال أطرافًا على طول جسمه، ويضم كل قسم من الجسم زائدة مختلفةً.

تحتوي الأقسام الأمامية من الرأس قرون استشعار، وتليها أقسام تحتوي قطعًا من الفك. (نسمي الفك والفك السفلي في اللافقاريات أطرافًا؛ لأنها مثل الزوائد الأخرى، تمتد من قسم من الجسم). يحمل الصدر أطرافًا أكبر حجمًا، بعضها متجه إلى الأمام، والبعض الآخر متجه إلى الخلف. وتمتد أطراف صغيرة من البطن أيضًا، وتكون كثّة في أجزاء البطن الأمامية وقصيرة في الخلف.

تنشط ستة من جينات لويس في أثناء نمو محور الجسم في البارهيال. وكما هي الحال في الذباب، يمكن التعرف على أقسام

الجسم المختلفة عن طريق أنواع الأطراف التي تنمو فيها وعن طريق تحديد أي الجينات تنشط في ذلك القسم في أثناء النُّمو. ماذا لو أمكنك تغيير نمط نشاط الجينات في الأقسام، على سبيل المثال: وضع جينات البطن النشطة داخل القسم الصدري؟ هل سيغير ذلك نوع الأطراف التي تنمو من ذلك القسم؟ أوقف باتل عمل الجينات واحدًا تلو الآخر، باستخدام تقنية تحرير الجينات التي طورتها زميلته في بيركلي.

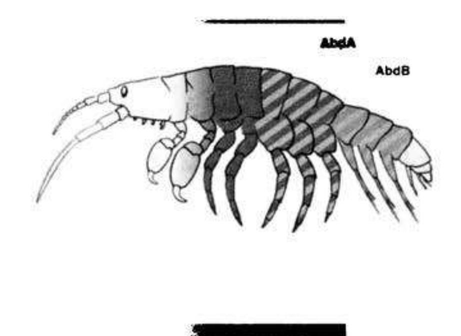
تظهر أناقة تجارب باتل في التفاصيل ثلاثة من جينات لويس، تسمى أوبكس Ubx، والبطني- أ Abd -A، والبطني-ب Abd-B، تنشط في الجزء الخلفي من البارهيال في أثناء النُّمو. ويشير نشاطها في الجسم إلى أربع مناطق: واحدة باتجاه الرأس، حيث ينشط أوبكس فقط، تليها منطقة أخرى، حيث ينشط كل من أوبكس والبطني-أ، وواحدة ينشط فيها البطني-أ والبطني-ب، وواحدة حيث ينشط فيها البطني-ب فقط. يمكنك أن تنظر إلى هذه المناطق الأربع على أن لكل واحدة منها عنوانًا جينيًّا يتحدد من خلال الجينات النشطة داخلها. تبين أن نمط نشاط الجينات يتوافق مع نوع الطرف الذي يتشكل. عندما ينشط جين أوبكس فقط، يتشكل الطرف المواجه للخلف، وينتج الجمع بين أوبكس/ البطني- أ في أحد الأقسام طرفًا متجهًا إلى الأمام، والبطني-أ البطني-ب طرفًا كثًّا، وفي قسم البطني- ب، طرفًا قصيرًا.

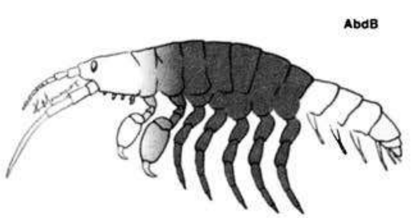
كانت خطة باتل هي حذف الجينات لتغيير عناوين أقسام الجسم المختلفة. ماذا يحدث عندما تغير نمط النشاط في كل قسم من أقسام

الجسم؟

عندما حذف باتل الجين البطني-أ، أصبحت أجزاء الجسم التي كان عنوانها في السابق أوبكس/ البطني-أ عنوانها الآن أوبكس فقط. والجزء الذي كان به البطني-أالبطني-ب أصبح عنوانه الآن البطني-ب. بهذا التغيير في العناوين، خرج مسخ تجريبي جميل: مخلوق ذو أطراف متجهة إلى الخلف، حيث كان من المفترض أن تكون الأطراف متجهة إلى الأمام، وأطراف قصيرة، حيث تكون الأطراف الكثة في الطبيعي.

أدى تغيير أنماط نشاط الجينات في أجزاء الجسم إلى تغيير الطرف الذي يتكون في كل قسم.





النمط المنتظم لنشاط الجينات (المناطق المظللة في الصورة العليا). يؤدي حذف الجينات إلى تغيير أنماط النشاط في الأقسام (الصورة في الأسفل) إلى تغيير أنواع الأطراف التي تنمو منها.

وجد باتل أنه يستطيع تغيير العناوين الجينية ونقل الأطراف في أنحاء الجسم حسب الرغبة. وهو بذلك، لم يكن يخلق المسوخ فحسب، بل كان يحاكي تنوع الحياة في الطبيعة.

قارن مزدوجات الأرجل بأبناء عمومتها متماثلات الأرجل. يعرف معظمنا متماثلات الأرجل من أحد أكثر أنواعها شيوعًا: قمل الخشب. كما يوحي الاسم متماثلات الأرجل isopod (باليونانية: «نفس الأرجل»)، فإن لديها أرجلًا متجهة إلى الأمام فقط، على عكس مزدوجات الأرجل التي لها أرجل تتجه إلى الأمام والخلف. عندما حذف باتل الجين البطني-أ الموجود في مزدوجات الأرجل، شكّل كائنات تشبه متساويات الأرجل: كانت لها أطراف متجهة إلى الأمام فقط. وفي ذلك، فقد قلّد الطبيعة أيضًا: تفتقر متساويات الأرجل إلى جين البطني-أ في تطورها الطبيعي.

تفسر التغييرات في هذه الجينات الاختلافات بين المخلوقات المتميزة عن بعضها، مثل: الكركند ومئويات الأرجل. إن مجموعة الجينات النشطة في مكان خروج مخلب الكركند الكبير تختلف عن تلك التي تكوّن الساق. وفي مخلوقات مثل مئويات الأرجل، حيث يكون في كل قسم نفس النوع من الأرجل، تنشط جينات متماثلة في كل قسم من الجسم. في: الحشرات، والديدان، والذباب، تمثل هذه الجينات خارطة طريق للجسم.

المسخ الكامن:

البارهيال والكركند والذباب ليست سوى بداية القصة. فالضفادع والفئران والبشر لديها نسخ من هذه الجينات أيضًا، لكن بأسماء مختلفة في البشر والثدييات الأخرى. وبدلًا من أسماء مثل: البطني-أ والبطني-ب وغيرها، يطلق عليها جينات هوكس Hox متبوعة برقم، مثل: هوكس1، وهوكس2 وما إلى ذلك. أيضًا، وحيث يملك الذباب والديدان والحشرات سلسلة واحدة فقط من هذه الجينات على كروموسوم واحد، فإن لدينا أربع مجموعات من هذه السلاسل على أربعة كروموسومات مختلفة.

تنشط هذه الجينات على طول محاور أجسام الفئران والبشر، وكما هي الحال في الذباب والبارهيال، فإنها تنشط في أجزاء مختلفة من الجسم. لا تنبت من أقسام جسمنا أجنحة، أو أرجلًا تواجه كل اتجاه. لكن لدينا فقرات وأضلاع. وعلى الرغم من هذه الاختلافات، يصبح السؤال: هل يعمل نمونا بنفس الطريقة التي يعمل بها في البارهيال والذباب؟ إذا غيرت نشاط الجينات في أثناء النُّمو الجنيني، فهل يمكنك إنتاج طافرات بأعداد مختلفة من الأضلاع والفقرات؟

يتبع العمود الفقري في الثدييات صيغة نادرًا ما تتغير: سبع فقرات عنقية، تليها اثنتا عشرة فقرة صدرية، يخرج من كل منها ضلع، ثم خمس فقرات قطنية. يتلو هذه المجموعة العجز والذيل الذي يوجد في البشر كمجموعة من الفقرات الصغيرة المندمجة تسمى: «العُصعص».

وكما هي الحال في الذباب والبارهيال، فإن أجزاء الجسم المختلفة لها عناوين مختلفة للنشاط الجيني. على سبيل المثال: تحدد مجموعة واحدة من الجينات الشبيهة بمزدوج الصدر منطقة العنق لدينا، وأخرى تمثل المنطقة الصدرية. وبالمثل، فإن الحدود بين المناطق الصدرية والقطنية وبين الفقرات القطنية والعجزية لها جينات مختلفة تنشط فيها.

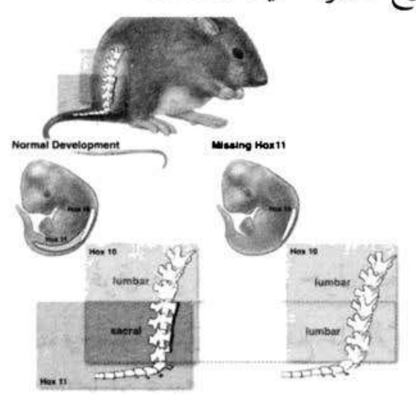
ماذا يحدث عندما يتغير عنوان جيني إلى عنوان آخر؟ إن صنع الطافرات في الفئران أصعب بكثير منه في الذباب أو البارهيال. يمكن أن يستغرق ذلك سنوات، ويرجع ذلك إلى حدٍّ كبير إلى أن وقت الإنسال أطول، وهناك جينات أكثر تحتاج إلى التحوير. لكن النتائج تستحق الانتظار.

خذ مثلًا الوضع بالنسبة للفقرات القطنية والعجزية. المنطقة التي تشكل الفقرات القطنية ينشط فيها الجين المعروف باسم: «هوكس10». تليها المنطقة العجزية التي لها عنوان جيني يتألف من جينين: هوكس10، وهوكس11. في الطافرة التي تُحذف فيها جينات هوكس11، يكون للأقسام التي تشكل العجز في الوضع الطبيعي العنوان الجيني القطني. وماذا يحدث لأقسام الجسم؟ تكون النتيجة النهائية فأرًا تحول فيه العجز بأكمله إلى فقرات قطنية.

تظهر التجارب الإضافية أنَّ هذا النمط يمكن أن يتكرر مع جينات وأجزاء مختلفة من الجسم. تحمل الفقرات الصدرية أضلاعًا. ومن خلال حذف الجينات، يمكن إعطاء النهاية الخلفية من العمود الفقري بأكملها العنوان الجيني للفقرات الصدرية. والنتيجة: فئران

ذات أضلاع تمتد حتى الذيل. وكما فعل باتل مع بارهيال، فإن تعديل الجينات يؤدي إلى تغيير أقسام الجسم والأعضاء التي تتطور داخلها.(64)

ويمكن أن يسمي المرء منتجات هذه التجارب مسوخًا، لكن هذا من شأنه أن يخفي مدى جمال الطريقة التي تكشف بها الآليات الكامنة وراء تنوع الحياة. ملاحظة عن الحياة في القرن التاسع عشر، واكتشاف في غرفة الذباب، وبيولوجيا الجينوم الحديث تجتمع كلها لتكشف عن الجمال الكامن داخل أجسام الحيوانات. تكشف الهندسة الوراثية التي تبني أجسام الذباب والفئران والبشر أننا جميعًا نسخ فريدة من معزوفة موسيقية واحدة. من مجموعة أدوات مشتركة تأتي فروع شجرة الحياة المتعددة.



يمكن للتغيرات في نشاط جينات هوكس أن تغير الفقرات العجزية إلى فقرات قطنية كما هو متوقع.

(64) حول دور الجينات متماثلات المحتوى في تطور الفقرات، انظر:
D. Wellik and M. Capecchi, "Hox10 and Hox11 Genes Are Required to Globally Pattern the Mammalian Skeleton," Science 301 (2003): 363–67; and D. Wellik, "Hox Patterning of the Vertebrate Axial Skeleton," Developmental Dynamics 236 (2007): 2454–63.

إعادة الاستخدام، وإعادة التدوير، وإعادة التوظيف

مع الكشف عن انتشار جينات لويس في كل الأنواع المختلفة، خضعت الدِّراسات الغامضة المنسية منذ فترة طويلة من القرن التاسع عشر لتدقيق متجدد. في أوائل التسعينيات، كانت ملاحظات وأفكار فلاسفة الطبيعة الكلاسيكيين، مثل: ويليام بيتسون بمثابة مادة غنية للتجارب المتطورة. لاحظ بيتسون أنَّ بعض أنواع الاختلافات الأكثر شيوعًا تستلزم تغيير عدد أجزاء الجسم أو ظهور أجزاء من الجسم في أماكن غريبة. وكان كالفين بريدجز، وإدوارد لويس، وعلماء الأحياء الجزيئية الذين أتوا لاحقًا، يقتفون المسار الذي تحدد قبل قرن تقريبًا. وكما كانت الحال في القرن التاسع عشر، كانت المسوخ والطافرات، سواء أكانت مصنّعة في المختبر أم عُثر عليها في الطبيعة، في مركز ذلك كله.

تلقيت تدريبي بين عالم الحفريّات ومجموعات المتاحف والبعثات الاستكشافية. لكن إحدى النتائج دفعتني إلى التعجيل لتعلم البيولوجيا الجزيئية بأسرع ما يمكن.

عندما استكشفتْ فرق من الباحثين حول العالم نشاط جينات هوكس في الفئران، وجدوا شيئًا غير متوقع على الإطلاق. لا تتحكم جينات هوكس في الفئران في تكوين الفقرات والأضلاع على طول محور الجسم فحسب، بل تنشط في أعضاء مختلفة من الجنين، من الرأس والأطراف إلى الأحشاء والأعضاء التناسلية. كما لو أن هذه الجينات يُعاد تخصيصها في أنحاء الجسم لبناء أي عضو له هيكله المقسم الخاص. كانت أنماط النشاط الجيني تشير إلى نوع من

عمليات القص واللصق البيولوجية، فقد أعيد توظيف العملية الجينية المستخدمة لتشكيل محور الجسم الرئيس؛ بغرض تصنيع بنىً جسمانية أخرى.

وقد كشف عدد من التجارب في أوائل التسعينيات أن نشاط هذه الجينات في الأطراف يشبه إلى حدٍّ كبير نشاطها في محور الجسم، فهي تنشط في أوقات مختلفة من النُّمو الجنيني، ويبدو أنها تضع عناوين وراثية على أجزاء مختلفة من الطرف. جميع الأطراف، من أرجل الضفادع إلى زعانف الحيتان، لها نمط هيكلي متماثل. فلكل منها عظمة واحدة في القاعدة، وهي العضد. ثم تمتد عظمتا الكعبرة والزند من المرفق. وفي النهاية توجد عظام الرسغ والأصابع. وفي حين أن أحجام العظام وأشكالها وأعدادها قد تختلف في المخلوقات التي تستخدم الأجنحة للطيران، أو الزعانف للسباحة، أو الأيدي للعزف على البيانو، فإن هذا النمط المتمثل في عظمة واحدة، ثم عظمتين، ثم عظام صغيرة وأصابع موجودة دائمًا. إنها سمة تشريحية كبيرة، نمط قديم يكمن وراء تنوع كل المخلوقات ذات الأطراف الممتدة من الهياكل.

وفوق ذلك، فإن هذه المناطق التَّشريحية الثلاث: العضد، والساعد، واليد - تتوافق مع ثلاث مناطق تنشط فيها جينات هوكس المختلفة. إذ تتوافق كل منطقة مع عنوان مختلف لنشاط الجينات، كما هي الحال في جسم: الذبابة، أو البارهيال، أو الفأر.

والآن يمكن للباحثين أن يتساءلوا: ماذا يحدث عندما نغير نمط النشاط الجيني في الأجزاء المختلفة من الأطراف؟ لقد رأينا في

البارهيال، وفي محور جسم الفئران، أن تغيير نمط النشاط الجيني في أقسام الجسم المختلفة يمكن أن تكون له تأثيرات يمكن التنبؤ بها على الأعضاء التي تتطور منها.

في التسعينيات، أنتج فريق من العلماء الفرنسيين طافرات عن طريق حذف جينات هوكس في الفئران، مثلما فعل باتل مع البارهيال. وعندما حذفوا جينات هوكس النشطة في الذيل، أنتجوا فأرًا طافرًا ليس له ذيل، ثم أدوا التجربة ذاتها على الأطراف. نفس جينات هوكس التي تصنع الذيل تنشط أيضًا في الأطراف. وهي تحدد الجزء الأخير من الطرف - اليد أو القدم. وعندما حذف الفريق الفرنسي الجينات ذاتها التي تنشط منها في الأطراف، أنتجوا مجموعة من الفئران تحتوي عظمة واحدة، ثم عظمتين في أطرافها فقط. هذه الفئران التي نمت وهي تفتقر إلى الجينات كانت أيضًا تفتقر إلى الأيدي.[65]

لقد أمضيت معظم حياتي المهنية أبحث في كيفية نشوء الأيدي والأقدام من زعانف الأسماك، وأمضيت أنا وزملائي ست سنوات في دراسة السجل الحفريّ للعثور على سمكة ذات عظام ذراع ومعصمين. وهنا، فجأة، أصبح لدينا دليل يوضح الجينات الضرورية لصنع الأيدي.

قادتني هذه النتيجة إلى اتباع نهج جديد في أبحاثي الخاصة، فضلًا

---

(65) تُعرف "جينات اليد" بشكلٍ أكثر دقة باسم هوكس13-a وهوكس13-d الورقة التي تصف حذفها في الفئران، هي:

C. Fromental-Ramain et al., "Hoxa-13 and Hoxd-13 Play a Crucial Role in the Patterning of the Limb Autopod," Development 122 (1996): 2997–3011.

عن جمع الحفريّات، أدركت أنني بحاجة إلى أن أمتلك القدرة على إجراء تجارب على الجينات. إن امتلاك هذه المجموعة من الأدوات سيمنحني القدرة على طرح أسئلة من نوع جديد: هل تملك الأسماك هذه الجينات؟ وإذا كانت الحال كذلك، فماذا كانت تفعل في زعانف الأسماك؟ وهل يمكن أن تساعد جينات اليد هذه في تفسير كيفية تحول الزعانف إلى أطراف؟

الأسماك التي تراها في السوق، أو في أثناء الغوص، أو في حوض السَّمك ليس لها أصابع أيدٍ وأقدام، تتألف الزعنفة في الغالب من مجموعة كبيرة من العظام الشعاعية وبينها نسيج شبكي. ويختلف العظم الموجود في أشواك الزعانف عن عظم الأصابع. تتشكل الأصابع في البداية من بوادر الغضاريف، بينما تتطور أشعة الزعانف مباشرة تحت الجلد. وكما نعلم من السجل الأحفوري، فإن الانتقال من الزعانف إلى الأطراف تضمن تغيرين كبيرين: امتلاك الأصابع وفقدان أشواك الزعانف.

ونظرًا لأن الفريق الفرنسي كشف عن الجينات الضرورية لتكوين الأيدي والأقدام في الفئران، فقد تعتقد أن هذه الجينات تقتصر على الكائنات ذات الأطراف، لكنك ستكون مخطئًا، فالأسماك لديها هذه الجينات أيضًا. ما الذي تفعله الجينات التي تنتج الأيدي والأقدام في زعانف الأسماك؟

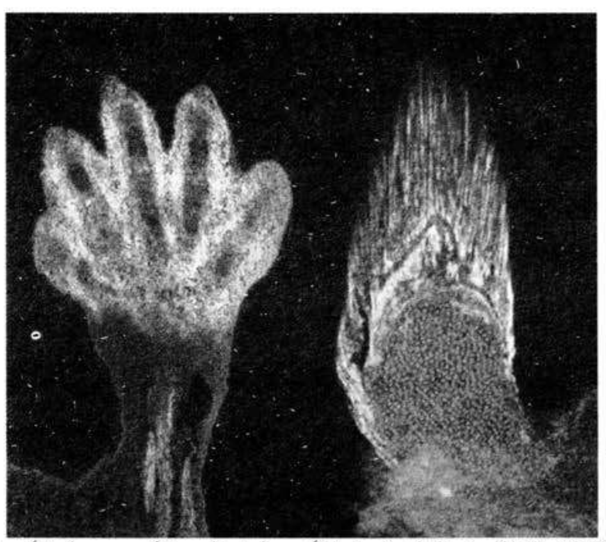
أمضى اثنان من علماء الأحياء الشباب أربع سنوات في استكشاف هذا السؤال في مختبري في شيكاغو. في البداية، عمل تيتسويا ناكامورا على إعادة تجارب جينات الثدييات، لكن على زعانف الأسماك. لقد

أزال الجينات بعناية، لكن الحيوانات التي تفتقر إلى هذه الجينات لم تعش طويلًا. لعلك تذكر أن هذه الجينات تنشط أيضًا في تكوين الفقرات، لذلك لا تستطيع الحيوانات الطافرة السباحة بسهولة. وبعد ثلاث سنوات من إنتاج الطافرات، ومساعدتها على البقاء، وجد ناكامورا شيئًا رائعًا: عندما حُذفت هذه الجينات من الجينوم، كانت الأسماك الطافرة تفتقر إلى أشواك الزعانف.

التقيت للمرة الأولى بالعالم الشاب الثاني في عام 1983، عندما أحضر أستاذ التَّشريح، لي جيركي، ابنه الرضيع الجديد إلى إحدى المحاضرات. لم أكن أعلم أنه بعد عقدين سيأتي الطفل آندرو جيركي للحصول على درجة الدكتوراه في مختبري. كان جيركي، مثل ناكامورا، يبقى في المختبر حتى الساعة الثالثة صباحًا في معظم الليالي لابتكار التجارب. كان مختبر في كندا قد كشف أنه عند وسم جينات اليد في الفئران وتتبع تطورها، تنتهي جميع الخلايا تقريبًا في الرسغ والأصابع. وليس في هذا كبير مفاجأة. إنما كانت المفاجأة في زعانف السَّمك. في إحدى الليالي المتأخرة، تتبع جيركي نشاط هذه الجينات في زعانف الأسماك والتقط لها صورة. ظهرت تلك الصورة في الصفحة الأولى لصحيفة نيويورك تايمز لسبب بسيط، وهو أنها: تروي قصة كبيرة. فالجينات الضرورية لبناء أيدي الفئران والبشر ليست موجودة فقط في الأسماك، ولكنها تصنع العظام التي توجد في نهاية هيكل الزعنفة، وهي أشواك الزعانف.

إن تحويل الزعانف إلى أطراف هو عالم من إعادة التوظيف على كل المستويات، فالجينات التي تصنع الأيدي والأقدام موجودة في

الأسماك، وهي تشكل النهاية الطرفية لزعانفها، كما تساعد نُسخ من تلك الجينات ذاتها في بناء النهاية الطرفية لأجسام الذباب وغيرها من الحيوانات. لا تنطوي الثورات الكبرى في الحياة بالضرورة على ابتكار: جينات، أو أعضاء، أو أساليب حياة جديدة بالكلية. إن استخدام الميزات القديمة بطرق جديدة يفتح عالمًا من الإمكانيات أمام الأحفاد.(66)



نمط النشاط الجيني اللازم لصنع الأيدي (على اليسار) موجود في الأسماك ويشكل النهاية الطرفية لزعانفها. تُظهر المنطقة المضيئة أين كانت جينات هوكس المتماثلة تنشط في أثناء التطور.

---

(66) دراسات تيتسويا ناكامورا وآندرو جيركي حول الجينات متماثلات المحتوى في تطور الزعانف موجودة في:

T. Nakamura et al., "Digits and Fin Rays Share Common Developmental Histories," Nature 537 (2016): 225–28.

وقد ورد عملهما أيضًا في مقالة كارل زيمر: "من الزعانف إلى الأيدي: العلماء يكتشفون رابطًا تطوريًا عميقًا"، نيويورك تايمز، 17 أب (أغسطس). 2016.

Carl Zimmer, "From Fins into Hands: Scientists Discover a Deep Evolutionary Link," New York Times, August 17, 2016.

إنَّ تعديل الجينات القديمة أو إعادة تخصيصها أو اختيارها يوفر الوقود للتغيير التطوري. وليست هناك حاجة إلى أن تنشأ الوصفات الوراثية من الصفر لصناعة أعضاء جديدة في الأجسام. بل يمكن أخذ الجينات والعلاقات الموجودة منها من على الرفوف وتعديلها لصنع أشياء جديدة رائعة. إن استخدام القديم لصنع الجديد يمتد إلى كل المستويات في تاريخ الحياة، حتى إلى ابتكار الجينات الجديدة نفسها.

الفصل الخامس

المقلدون

في القرنين السابع عشر والثامن عشر، كانت أجسام الحيوانات بمثابة حدود تدعو للمهابة تمامًا مثل الرحلات الاستكشافية إلى أقاصي الكوكب. ولمَّا تكن السمات التَّشريحية الأساسية لدى البشر قد اكتُشفت بعد، ناهيك عن المخلوقات المختلفة التي جُمعت في الأجزاء النائية من الأرض. ومثل الجبال والأنهار وغيرها من الهياكل في الجغرافيا، كثيرًا ما كانت تسمى أجزاء الجسم باسم من اكتشفوها. تربطنا أسماؤها تاريخيًّا بمئات العظماء الذين استكشفوا بنية الأجسام لأول مرة. هناك حزمة باخمان Bachmann's bundle، وهي حزمة كهربائية في القلب. وفي العين يوجد وتر زِن الحلقي Zinn، وهو عبارة عن حلقة من الأنسجة الليفية تحيط بالعصب البصري. ومن يستطيع أن ينسى اسم حشوة هنري المتحركة Mobile Wad of Henry الذي يبدو أشبه بمزحة جامعية من اسم كتلة العضلات الموجودة على الجانب الخارجي من الساعد.

لم يكن المسكتشفون الذين صاغوا هذه الأسماء يضعون أعلامهم على أجزاء مختلفة من الجسم فحسب، بل كانوا يكتشفون أنماطًا عميقة في الطبيعة. هناك تكوينان يحملان اسم الطبيب الفرنسي

فيليكس فيك دازير (1748-1794): شريط فيك دازير وحزمة فيك دازير، وكلاهما في الدماغ. وبصفته مؤسس علم التَّشريح العصبي الحديث ومؤسس علم التَّشريح المقارن لاحقًا، فهو شخصية لا تحظى بالتقدير في تاريخ العلم. كان فيك دازير واحدًا من أوائل الذين قارنوا بين التراكيب التَّشريحية للحيوانات المختلفة مع التركيز على فك رموز القوانين الأساسية المسؤولة عن ظهور التراكيب الجسمانية بالطريقة التي تبدو بها.[67]

لم يقارن فيك دازير التراكيب التَّشريحية المتشابهة بين الأنواع فحسب، بل درس أيضًا النظام داخل الأجسام. وفي تشريح الأطراف البشرية، رأى أن الأطراف الأمامية والأطراف الخلفية كانت في الأساس نسخًا من بعضها. تَتْبع عظام الذراع والساق نفس النمط: عظمة – ثم عظمتان – ثم عظام عديدة – ثم مجموعة الأصابع. وقد عمّق هذه المقارنات، فرأى كيف أن عضلات الذراع والساق تتبع أنماطًا مماثلة، كما لو أنها جزء من سلسلة متكررة من الأعضاء المنسوخة.[68]

---

(67) فيك دازير شخصية لا تحظى بالتقدير في تاريخ علم التشريح. لقد قدم العديد من نفس الملاحظات التي أبداها ريتشارد أوين بشأن تشابه الشكل (مثل: التماثل)، لكنه لم يعممها قط، لذلك لا يُنسب إليه الفضل الكبير في أصلها، انظر:

R. Mandressi, "The Past, Education and Science. Félix Vicq d'Azyr and the History of Medicine in the 18th Century," Medicina nei secoli 20 (2008): 183–212 (in French); and R. S. Tubbset al., "Félix Vicq d'Azyr (1746–1794): Early Founder of Neuroanatomy and Royal French Physician," Child's Nervous System 27 (2011): 1031–34.

(68) هناك نظرة أحدث حول فكرة الأعضاء المتكررة في الجسم المعروفة باسم: "التماثل التسلسلي"، موجودة في:

وبعد ما يقارب سبعين عامًا، وسّع عالم التّشريح البريطاني السيد ريتشارد أوين (1804-1892) فكرة فيك دازير لتشمل الجسم بأكمله وجميع الهياكل العظمية للحيوانات. تبدو الأضلاع والفقرات وعظام الأطراف كأنها نسخ معدلة من بعضها، متشابهة في التصميم العام، ولكن مع وجود اختلافات طفيفة في الشّكل والحجم والموضع في الجسم. وقد تأثر أوين بشدة بهذه الفكرة لدرجة أنه اقترح أن النُّموذج الأصلي لجميع الهياكل العظمية، من الأسماك إلى البشر كان مخلوقًا بسيطًا يحتوي كتلًا من الفقرات والأضلاع تمتد من الذيل إلى الرأس.

لم يكشف فيك دازير وأوين عن نمط أساسي في الأجسام فحسب، بل كشفوا حقيقة تخص البيولوجيا بأكملها، والأهم ما يخص الحمض النووي.

بريدجز مرة أخرى:

كان التّشريح الدقيق في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر بمثابة مقدمة للجهود الحثيثة في غرفة الذباب التي أنشأها مورجان. في عام 1913، عثر صبرا كوبي تايس، أحد طلاب مورجان، على ذبابةٍ ذكر بعينين صغيرتين للغاية. كان هذا الطافر نادرًا، وهو الوحيد بين المئات من النسل الطبيعي. من خلال إنسال الذباب في المختبر وقضاء بضعة أشهر في العثور على الذكور والإناث، تمكن تايس في النهاية من تربية المزيد منه.[69]

Günter Wagner, Homology, Genes, and Evolutionary Innovation (Princeton, NJ: Princeton University Press, 2018).

(69) وُصفت طفرة العيون الصغيرة لأول مرة في:

في عام 1936، قبل عامين من وفاته، قرر كالفين بريدجز استخدام تقنيات جديدة متناهية الصغر لرؤية المادة الوراثية للطافرات ذات العيون الصغيرة. تتناسب هذه التقنية مع مهارات بريدجز الدقيقة بشكلٍ جيد، فبدأ بإزالة رقع صغيرة من الخلايا من الغدة اللعابية، ثم تسخينها، ووضعها على شريحة زجاجية، ثم وضعها تحت المجهر بتكبير عالٍ لرؤية داخل الخلايا. فعل ذلك بشكل صحيح يجعل الكروموسومات مرئية داخل الخلايا. لم يكن بريدجز يعرف شيئًا عن الحمض النووي، لكنه كان يعلم أن الكروموسومات تحتوي جينات.

للكروموسومات الحيوانية والنباتية: أعداد، وأشكال، وأحجام مختلفة. كما رأينا في حالة طفرة الصدر المزدوج، عندما تُجهز الكروموسومات بالتقنيات التي استخدمها بريدجز، فإنها تظهر مخطّطة بخطوط داكنة وفاتحة، بعضها سميك والبعض الآخر رقيق بالتناوب، فيما يبدو للوهلة الأولى أنه أنماط عشوائية. لكن تنظيم الخطوط هو المفتاح، فهي بمثابة نظام إحداثيات لموضع الجينات التي حددها مورجان وفريقه. تتذكر أن الجينات عبارة عن امتدادات من الحمض النووي مطوية وملتفة على نفسها لتكوّن الكروموسومات. وتتحدد مواقع الجينات من خلال مكان وجودها بالنسبة للخطوط الداكنة والفاتحة. فتُعرف الطفرة من خلال التغيير الموضعي في نمط الخطوط، ونحن الآن نعلم أن الخطوط تشبه نظام تحديد المواقع

Sabra Colby Tice, A New Sex-linked Character in Drosophila (New York: Zoological Laboratory, Columbia University, 1913).

العالمي (GPS)، لكن بتغطية ضعيفة من الأقمار الصناعية، فهي تحدد موقع الخلل الجيني للطافرة، ولكن ليس بدقة.

أعد بريدجز كروموسومات الذبابة الطافرة ذات العيون الصغيرة، ثم قارن نمط الخطوط مع نمط الذباب العادي. كان نمط الخطوط متطابقًا باستثناء منطقة واحدة، فكان لدى المتحولة ذات العيون الصغيرة كروموسوم واحد أطول، ويبدو أن رقعة كاملة من الخطوط الفاتحة والداكنة كانت تكرارًا للجزء المجاور لها. ولأنه كان مقتنعًا بأن هذا يمثل تضاعف جزء واحد من الجينوم، قدم بريدجز ملاحظات مفصلة، وتكهن بأن نوعًا ما من عملية النسخ الجيني المعيبة كانت السبب في أن الذبابة لديها عيون صغيرة بشكل غير طبيعي وكروموسوم أطول.

وبينما تصور فيك دازير وأوين ومعاصريهما أن الأجسام تتألف من أجزاء متكررة، كان كالفين بريدجز قد بدأ يرى نسخًا في داخل الجينوم. عندها كانت بداية فكرة التضاعف الجيني.[70]

موسيقى الجينات:

قال ستيف جوبز ذات مرة: «كان بيكاسو يقول: 'الفنان الجيد يُقلد، أمّا العظيم، فيسرق' - ونحن [في أبل] لا نتورع عن سرقة الأفكار العظيمة». وما يسري على الفن والتقنيّة يسري أيضًا على

---

(70) استخدام بريدجز لخرائط الكروموسومات للكشف عن تضاعف الجينات موجود في:

"Calvin Bridges, "Salivary Chromosome Maps: With a Key to the Banding of the Chromosomes of Drosophila melanogaster," Journal of Heredity 26 (1935): 60–64.

الجينات. لماذا تبدأ من الصفر إذا كان بإمكانك أن تُقلد أو حتى أن تسرق؟

قبل أن ينطق جوبز هذه الكلمات بعقود، كان باحث هادئ، يعمل بمفرده معظم الوقت، يطبقها على علم الوراثة. كان سوسومو أونو (1928–2000) في مركز سيتي أوف هوب، في كاليفورنيا، يمارس هواية ترجمة بنية البروتينات إلى مقطوعات موسيقية للكمان والبيانو. كان يعلم أن البروتينات تتألف من سلاسل من الأحماض الأمينية، وكان يستخدم الجزيئات كنغمات موسيقية مختلفة. كان للموسيقى صدى عميق شبه صوفي بالنسبة له. وبدت له الموسيقى الناتجة من بروتين خبيث مسبب للسرطان، مثل: مقطوعة المسيرة الجنائزية لشوبان. وكانت الموسيقى المأخوذة من تسلسل البروتين الذي يساعد الجسم في هضم السكريات بمثابة تهويدة لأذنه. لقد وجد أونو أكثر من مجرد المراثي والألحان في الجينات والبروتينات، فقد وجد فهمًا جديدًا للابتكار البيولوجي.

نشأ أونو على يد وزير التعليم في الوصاية الملكية اليابانية في كوريا، وكان محظوظًا بحصوله على فرص تعليمية وتحديات فكرية منذ سن مبكرة جدًّا. وحسب روايته، فإن هدف حياته جاء من حبه للخيول في طفولته. كان يقضي عطلات نهاية الأسبوع في ركوب الخيل، وتوصل إلى رأي مفاده: إنه «عندما يكون الحصان سيئًا، فلا يمكنك فعل الكثير لجعله أفضل». وبالنسبة له، كان مفتاح فهم الخيول المختلفة يكمن في فهم الجينات التي تجعلها أسرع أو أبطأ، أقوى أو أضعف، أكبر أو أصغر. وقد درس علم الوراثة في اليابان، ثم في

جامعة كاليفورنيا، وكان على دراية بعمل مورجان وبريدجز، فقضى أيامه في دراسة الكروموسومات بحثًا عن أنماط تصف أوجه التشابه والاختلاف بين الكائنات الحية.



سوسومو أونو (على اليسار)

في الستينيات، وباستخدام تقنيات لا تختلف كثيرًا عن التي استخدمها بريدجز قبل عقود، صبغ أونو خلايا أنواع مختلفة من الثدييات بمواد كيميائية للكشف عن خطوط الكروموسومات الخاصة بها. ثم التقط صورًا لها، وقصها مثل الدمى الورقية، ووضعها على الطاولة. ومن خلال صور الكروموسومات المقصوصة الموضوعة أمامه، كان قادرًا على طرح السؤال، ما الاختلافات بين كروموسومات الأنواع المختلفة؟ لقد كانت طريقة عبقرية ولا تحتاج إلى تقنيات عالية للوصول إلى التغيّرات الجينية التي تسبب الاختلافات بين الأنواع.

بدأ أونو بمقارنة كروموسومات أنواع الثدييات، بدءًا من

الزبابات الصغيرة وحتى الزرافات. وبعد أن حصل على خلايا أنواع مختلفة من حدائق الحيوان ومصادر أخرى، كانت ملاحظته الأولى هي أن العدد الإجمالي للكروموسومات في الأنواع المختلفة يمكن أن يختلف بشكل كبير، من سبعة عشر زوجًا في فأر الحقل الزاحف إلى أربعة وثمانين زوجًا في وحيد القرن الأسود.

ثم فعل أونو شيئًا أنيقًا في بساطته، ولكنه قوي في آثاره. فوزن قطع الورق التي تخص كروموسومات كل نوع. لقد قدّر أن وزن القصاصات يمكن أن يكون بمثابة مؤشر على الكمية الإجمالية للمادة الوراثية في خلايا المخلوق. كان يزن قطعًا من الورق المقوى لصور الكروموسومات، وليس الكروموسومات نفسها، لكن الأوزان النسبية هي ما يهم. ولكي تنجح هذه الفكرة، كان على أونو أن يقص الكروموسومات من الصور بعناية شديدة. وعندما وزن قصاصات الكروموسومات السبعة عشر الموجودة في فأر الحقل وقصاصات الكروموسومات الأربعة والثمانين من وحيد القرن الأسود، كان الوزن الإجمالي لكل نوع هو نفسه تقريبًا.

في الواقع، كانت قصاصات جميع الأنواع المختلفة من الثدييات لها نفس الوزن، من الفيلة إلى الذبابات. خلص أونو إلى أن الأوزان المتشابهة لقصاصات الورق المقوى أظهرت أن أوزان الكروموسومات كانت ذاتها في الثدييات المختلفة. وقد ظل هذا التشابه قائمًا على الرغم من الاختلافات الكبيرة في عدد الكروموسومات في الأنواع المختلفة.

وسّع أونو مقارناته، فشملت مخلوقات أخرى، فهل تملك الأنواع

المختلفة من البرمائيات والأسماك أيضًا نفس الكمية من المادة الوراثية؟ تتشابه أنواع السَّمندل في أشكالها، ولذلك افترض أونو أن مادتها الوراثية ينبغي أن تكون ذاتها تقريبًا. لكن عملية قص الكروموسومات ووزنها جاءت بمفاجأة كبرى، فقد تحتوي الأنواع المختلفة المتشابهة من الناحية التَّشريحية كميات متفاوتة من الحمض النووي في خلاياها، حيث تحتوي بعض الأنواع خمسة إلى عشرة أضعاف تلك الموجودة في الأنواع الأخرى. وينطبق الشيء نفسه على أنواع الضفادع. وفوق ذلك، فإن كمية المادة الوراثية لكل من النوعين من البرمائيات تفوق تلك الموجودة في البشر والثدييات الأخرى. تحتوي بعض السمادل والضفادع مادة وراثية أكثر بخمسة وعشرين مرة من تلك الموجودة في البشر.

ومن خلال قصاصات الورق المقوى، اكتشف أونو شيئًا أكدته مشاريع الجينوم التي أُنفق عليها مليارات الدولارات بعد عقود.

إن درجة تعقيد الحيوان والاختلافات بين الأنواع لا تتوافق مع كمية المادة الوراثية في الخلايا؛ ونظرًا لأن السمادل تبدو متشابهة في العموم على الرغم من أن أحد الأنواع يحتوي حمضًا نوويًا أكثر بعشر مرات من الآخر، ولا يبدو أن تلك المادة الوراثية الإضافية مرتبطة بأي اختلاف ملحوظ في تشريح الحيوانات، فقد توقع أونو أن جينوم السمادل والأنواع الأخرى مليئة بامتدادات لا معنى لها من الحمض النووي. كان هذا الحمض النووي، على حد تعبيره: «سَقَط».

لاحظ أونو أن السَّمندل صاحب الجينوم الأكبر يميل أيضًا إلى امتلاك أنماط غريبة من الخطوط على طول كروموسوماته، حيث

يبدو أن امتدادات بأكملها تتألف من نطاقات متكررة أو منسوخة. وتكهن بأن كل هذا الحمض النووي الزائد في خلايا السمادل والضفادع جاء نتيجة الجينات المكررة، كما لو أن بعض أجزاء الجينوم قد نُسخت مرات ومرات ومرات. كل ذلك «السَّقَط» جاء من عملية نَسخ خرجت عن السيطرة. كان أونو يظن أن التكرار كان عاملًا رئيسًا في التحولات العظيمة في تاريخ الحياة. وكما يفعل المحقق الجيد، سعى إلى فهم كيف حدث هذا وما قد يعنيه ذلك بشأن الماضي التطوري.

وكان أونو يعرف أنه عندما تنقسم الخلايا تُنسخ الكروموسومات وقد تحدث الأخطاء. شاهدت مجموعة توماس هنت مورجان في غرفة الذباب انقسام الخلايا. ومن خلال خطوط الكروموسومات، تمكنوا من رؤية كيف تتناسخ وأنواع الأخطاء التي تحدث في الخلايا. تملك معظم الحيوانات مجموعتين من الكروموسومات في كل خلية، واحدة من الأب وأخرى من الأم. ولدى البشر ثلاثة وعشرون زوجًا من الكروموسومات، كل زوج يحتوي كروموسومًا من الأم وآخر من الأب، ما يمنحنا إجمالي ستة وأربعين كروموسومًا. وبينما تحتوي معظم خلايانا نسختين من كل كروموسوم، فإنَّ الحيوان المنوي والبويضة لديهما نسخة واحدة فقط. عندما تُصنع الحيوانات المنوية والبويضات، يتضاعف الحمض النووي وتُنسخ الكروموسومات، وتُوزع مجموعة واحدة فقط من الكروموسومات لكل حيوان منوي وبويضة. لكن الأخطاء قد تحدث. عندما تُنسخ الكروموسومات، يحدث في كثير من الأحيان أن تتبادل أزواج

الكروموسومات الجديدة المواد الوراثية. إذا كان التبادل غير متكافئ، فيمكن أن تذهب بنسخ إضافية من الجينات إلى أحد الكروموسومات، بينما يحصل الآخر على نسخ أقل. ويمكن أن ينتج عن هذه العملية نسلًا يحتوي نسخًا عدة من نفس الجين وجينوم أكبر نتيجة ذلك، يشبه إلى حدٍّ كبير ما رآه بريدجز في الذبابة ذات العيون الصغيرة، أو ما وجده أونو في قصاصاته من الورق المقوى.

هناك نوع آخر من الأخطاء يمكن أن يغير الجينوم بأكمله. بعد أن تُنسخ الكروموسومات، تنتقل إلى خلايا الحيوانات المنوية والبويضات الجديدة. وإذا لم تنتقل بشكل صحيح إلى وجهاتها الجديدة، فقد تحصل بعض الحيوانات المنوية أو البويضات على كروموسومات إضافية. هذا التكرار ليس فقط لجينٍ واحد، بل لآلاف عدة يمكن أن توجد على الكروموسوم. يمكن للحيوان المنوي أو البويضة الآن تكوين جنين لا يحتوي المجموعتين الطبيعيتين، ولكن في بعض الأحيان يحتوي كروموسوم إضافي شارد أو مجموعة كاملة منها. فبدلًا من نسختين من كل كروموسوم،[71] قد يحتوي الحيوان المنوي أو البويضة ثلاثة أو أكثر.

إن وجود كروموسوم إضافي واحد يمكن أن يؤدي إلى تغييرات جذرية. في كثيرٍ من الأحيان، مع تغيّر توازن المادة الوراثية، يتعطل التفاعل الدقيق بين الجينات الضرورية للتطور الطبيعي. وإحدى النتائج هي التشوهات الخلقية عند الولادة. تحدث متلازمة داون

(71) كذا في الأصل، لكن يحتوي الحيوان المنوي أو البويضة مجموعة واحدة من الكروموسومات غير المزدوجة، أمّا الخلايا الجسمانية الأخرى، فهي التي تحتوي مجموعتين من الكروموسومات، أي: أزواج منها. (المترجم).

عندما يحصل الجنين على نسخة إضافية من الكروموسوم 21. وتؤثر المتلازمة في الجسم بأكمله، من الجهاز العصبي إلى: الذقن، والعينين، وتجاعيد راحة اليد. جمع علماء الوراثة كتالوجات تصف ما يحدث للكروموسومات، بدءًا من متلازمة باتو، حيث يمتلك الجنين نسخة إضافية من الكروموسوم 13، إلى متلازمة إدواردز التي تنتج عن كروموسوم 18 إضافي. وفي كل من الحالتين، يتأثر نمو: المخ، والهيكل العظمي، والأعضاء - أي: تقريبًا كل أجزاء الجسم.

إنَّ الحصول على كروموسوم إضافي واحد شيء، وأن يحصل الجنين على مجموعة كاملة مكررة من الكروموسومات شيء آخر تمامًا. في هذه الحالة يمكن أن يحدث السحر البيولوجي. فبدلًا من النسختين الطبيعيتين من كل جين، قد يحتوي ثلاث نسخ أو أربع نسخ أو حتى ست عشرة أو أكثر. في كل وجبة تقريبًا، نلتهم أفرادًا بهم مجموعات إضافية من الكروموسومات. يحتوي الموز والبطيخ ثلاث مجموعات، والبطاطس والكراث والفول السوداني لديها أربعة، والفراولة ما يصل إلى ثمانية. أدرك مربو النباتات في وقت مبكر أنه من خلال تربية النباتات ذات الجينوم المكرر بالكامل، سيكون لدى النسل في بعض الأحيان مجموعات إضافية من الكروموسومات، ويكون أكثر حيوية أو ألذ. لا أحد يعرف السبب، لكن البعض يعتقد أنَّ المادة الوراثية الإضافية تُوظف في استخدامات جديدة لجعل النُّمو والتمثيل الغذائي أكثر حيوية.

تحدث هذه الزيادة في الكروموسومات بانتظام في الطبيعة، فعندما يخصب حيوان منوي يحتوي مجموعة إضافية من الكروموسومات

بويضةً تحتوي مجموعة إضافية، فسيكون الجنين بذلكَ قادرًا على الحياة، وحتى أكثر قوة. وسيكون ذلك الفرد الجديد مختلفًا عن أقرانه. وفي بعض الأحيان، ونظرًا لأنه يحتوي جينومًا يختلف كثيرًا عن جينوم والديه أو إخوته، فإنه لا يمكنه التناسل بشكلٍ فعال إلا مع الأفراد الذين يملكون أيضًا مجموعة إضافية من الكروموسومات. إنهم نوع من المسوخ الواعدة، طفرة جينية تنتج في خطوة واحدة، عن طريق تغيير توزيع الكروموسومات على الحيوان المنوي والبويضة. هناك أكثر من ستمائة ألف نوع من النباتات المزهرة في العالم. يملك أكثر من نصفها مجموعات مكررة من الكروموسومات، وقد ظهرت أنواعها من خلال تحوّل بسيط في كيفية تكوين الحيوانات المنوية والبويضات.

لكن ما يشيع في النباتات يندر في الحيوانات، فمثل هذه الطافرات نادرًا ما تكون قادرة على الحياة في: الثدييات، أو الطيور، أو الزواحف. الحيوانات التي توجد منها أعداد كبيرة من الأنواع التي تملك مجموعات إضافية من الكروموسومات هي: الزواحف، والبرمائيات، والأسماك. وكثيرًا ما تولد السحالي بمجموعات متعددة من الكروموسومات. والأفراد الذين يعانون من هذه الحالة ينمون ويبدون طبيعيين، ولكنهم عادةً ما يكونون عقيمين. ومع ذلك، يمكن أن تحتوي الضفادع وأنواع من الأسماك مجموعات متعددة وتتكاثر بشكل طبيعي.

عندما صنع أونو قصاصات الورق المقوى، كان يعلم أن الأخطاء البسيطة في الخلية يمكن أن تؤدي إلى تكرار الكروموسومات،

وأجزاء من الكروموسومات، وحتى مجموعات كاملة من الكروموسومات. ولذلك تصور عالمًا من النسخ ونسخ النسخ. بالنسبة له، كانت التكرارات هي بذور الابتكار.

كانت قصاصات السَّمندل والضفادع بمثابة ملهم لرؤية جديدة للابتكارات الجينية في تاريخ الحياة. كانت الفكرة السائدة هي أن وقود التطور بالانتخاب الطبيعي هو تغيّرات صغيرة في الجينات. ماذا لو، كما افترض أونو، أن محرك التغيير التطوري هو تضاعف الجينات؟ وأن الابتكارات تأتي جاهزة للاستخدامات الجديدة. إذا تكرر الجين، يصبح هناك جينان، حيث كان في السابق جين واحد فقط. وهذا النوع من الوفرة يعني أن أحد الجينات يمكن أن يبقى كما هو ويحافظ على الوظيفة القديمة، بينما يمكن للنسخة الأخرى أن تتغير وتكتسب وظيفة جديدة، كما يمكن إنتاج جين جديد دون أي تكلفة تقريبًا على حامله.

يمكن للتكرار أن يمثّل الأساس للتغيير على كل مستوى من مستويات الجينوم. تأتي الأجزاء المفيدة جاهزة لتأخذ التغيير في اتجاهات جديدة – يُستخدم القديم لصُنع الجديد.

عندما جاء الوقت الذي انتهى فيه أونو من صنع قصاصات الكروموسومات، أصبحت تسلسلات البروتينات المختلفة متاحة بشكلٍ مُتزايد. وقد أكدت اتساع عملية النسخ الذي يحدث في الجينوم. لقد كانت النُسخ في كل مكان: يمكن نسخ الجينوم بأكمله، ويمكن تكرار الجينات، وحتى أجزاء من البروتينات تبدو كأنها تحتوي تسلسلات متكررة بداخلها. تلك البروتينات المكررة، مثلت

موسيقى خاصة بالنسبة لأونو. وكثيرًا ما كان يُدعى أونو وزوجته ميدوري، وهي مغنّية، لأداء شيء من موسيقاهما المستوحاة من الجزيئات المكررة في المناسبات الاجتماعية.[72]

نُسخ في كل مكان:

يشبه الجينوم على كل المستويات مقطوعة موسيقية تتكرر فيها الجُمل الموسيقية ذاتها بطرق لتكوين أغانٍ تختلف فيما بينها كثيرًا.

في الواقع، لو كانت الطبيعة مؤلِّفة موسيقية، لكانت واحدة من أكبر منتهكي حقوق النشر في التاريخ - كل شيء، من أجزاء الحمض

---

(72) قصة حياة سوسومو أونو مذكورة في:

U. Wolf, "Susumu Ohno," Cytogenetics and Cell Genetics 80 (1998): 8–11; and in Ernest Beutler, "Susumu Ohno, 1928–2000" Biographical Memoirs 81 (2012), from the National Academy of Sciences, online at https://www.nap.edu/read/10470/chapter/14.

أعمال أونو في عددٍ من الأوراق البحثية وفي كتاب يجمع أعماله حول التكرارات:

Susumu Ohno, "So Much 'Junk' DNA in Our Genome," 336–70, in H. H. Smith, ed., Evolution of Genetic Systems (New York: Gordon and Breach, 1972); Susumu Ohno, "Gene Duplication and the Uniqueness of Vertebrate Genomes Circa 1970–1999," Seminars in Cell and Developmental Biology 10 (1999): 517–22; and Susumu Ohno, Evolution by Gene Duplication (Amsterdam: Springer, 1970).

Yves Van de Peer, Eshchar Mizrachi, and Kathleen Marchal, "The Evolutionary Significance of Polyploidy," Nature Reviews Genetics 18 (2017): 411–24; and S. A. Rensing, "Gene Duplication as a Driver of Plant Morphogenetic Evolution," Current Opinion in Plant Biology 17 (2014): 43–48

T. Ohta, "Evolution of Gene Families," Gene 259 (2000): 45–52; J. Thornton and R. DeSalle, "Gene Family Evolution and Homology: Genomics Meets Phylogenetics," Annual Reviews of Genomics and Human Genetics 1 (2000): 41–73; and J. Spring, "Genome Duplication Strikes Back," Nature Genetics 31 (2002): 128–29.

النووي إلى الجينات بأكملها والبروتينات، هو نسخة معدلة من شيءٍ آخر. إن رؤية التكرارات في الجينوم تشبه أن ترتدي نظارة جديدة: يبدو العالم مختلفًا. بمجرد أن ترى التكرارات في الجينوم، تراها في كل مكان. تبدو المواد الجينية الجديدة كأنها نسخ من أشياء قديمة أُعيد توظيفها لاستخدامات جديدة. تشبه القوة الإبداعية للتطور المُقلد الذي كان ينسخ ويعدل الحمض النووي القديم، والبروتينات، وحتى المسودات التي تبني الأعضاء، لمليارات السنين.

أول من نظروا إلى تسلسلات البروتين، ومن بينهم زوكركاندل وبولينج، قابلتهم التكرارات. فالهيموغلوبين البروتين الذي ينقل الأوكسجين في الدم، موجود في أشكال عدة، كل منها يناسب حالة مختلفة من الحياة. إذ تختلف احتياجات الجنين عن احتياجات الشخص البالغ. في الرحم، يأتي الأوكسجين من دم الأم، بينما عند البالغين، يأتي من الرئتين. تتميز مراحل الحياة هذه بوجود أنواع مختلفة من الهيموغلوبين، لكنها نسخ من بعضها.

ويبدو أن تسلسلات الأحماض الأمينية المختلفة في البروتينات هي نسخ من بعضها أيضًا، ويمكنك أن تجد أمثلة في كل الأنسجة والأعضاء، كـ: الجلد، والدم، والعينين، والأنف، على سبيل المثال لا الحصر.

الكيراتين هو البروتين الذي يمنح أظافرنا وجلدنا وشعرنا خصائصها الفيزيائية المميزة. يحتوي كل نسيج نوعًا مختلفًا من الكيراتين، بعضها مرن، وبعضها صلب. تشكلت عائلة جينات

الكيراتين من جين كيراتين قديم واحد نُسخ لصنع كيراتين مخصص لكل نسيج.

إننا نرى الألوان بسبب وجود بروتينات تسمى: «الأوبسين opsins». يرى البشر مجموعة واسعة من الألوان؛ لأن لدينا ثلاثة أوبسينات، كل منها مضبوط لاستقبال طول موجي مختلف من الضوء: الأحمر، والأخضر، والأزرق. وقد نُسخت هذه الأوبسينات، فأصبحت ثلاثة بدلًا من واحد، ما وسّع حدة البصر.(73)

وينطبق نمط مماثل على الجزيئات التي تساعد في الشم. تتحدد مجموعة الروائح التي يمكن للحيوان إدراكها إلى حدٍّ كبير من خلال عدد جينات المستقبلات الشمية الموجودة لديه. لدى البشر حوالي خمسمائة منها، لكننا بعيدون مقارنة بالكلاب والفئران التي تملك ألف وألف وخمسمائة على التوالي. (الأسماك لديها قرابة 150 منها)، وبالنسبة لـ: الرؤية، والشم، والتنفس، وكل شيء آخر تفعله الحيوانات تقريبًا، فإن الجينات المكررة هي التي تجعل كل ذلك ممكنًا. كل بروتين في الجسم تقريبًا هو نسخة معدلة من بروتين قديم، أعيد استخدامه لوظائف جديدة.

وكما رأى لويس وآخرون ممن تبعوه، فإن الجينات التي تبني

---

(73) هناك العديد من الأمثلة على عائلات الجينات وتطورها. أحد جينات الأوبسين المؤثرة في الرؤية هو مثال جميل. انظر:

R. M. Harris and H. A. Hoffman, "Seeing Is Believing: Dynamic Evolution of Gene Families," Proceedings of the National Academy of Sciences 112 (2015): 1252–53.

الأجسام غالبًا ما تكون نسخًا معدلة من بعضها. جينات لويس، وجينات الصدر المزدوج في الذباب، وجينات هوكس في الفئران كلها نسخ. جينات هوكس التي تشارك بشكلٍ كبير في هندسة الجسم، هي عائلة جينية كبيرة زاد عددها بمرور الوقت. والبشر، مثل: الفئران، لديهم تسعة وثلاثون، في حين أن الذباب لديه ثمانية فقط منها. وينطبق الشيء ذاته على الأدوات الجينية الرئيسة الأخرى التي تبني الأجسام الحيوانية. تؤدي عائلة جينات باكس Pax دورًا في تكوين: العيون، والآذان، والحبل الشوكي، والأعضاء الداخلية. إذ إن هناك تسعة منهم. يشارك باكس 6 في نمو العين، وباكس 4 في البنكرياس. والأجنّة التي تفتقر إلى هذه الجينات لا تحتوي هذه الأعضاء. كان جد تلك الجينات عبارة عن جين باكس واحد استُنسخ، واكتسبت النسخ المختلفة وظائف جديدة في الأنسجة والأعضاء المختلفة.

نحن نعلم الآن أن الجينات الموجودة في الجينوم هي جزء من عائلات جينية، مليئة بالنسخ المكررة، التي تشترك في التسلسلات الأساسية. ويمكن أن تتكون العائلة من عدد بسيط من الجينات أو الآلاف منها، ولكل منها وظائف مختلفة. وكل ذلك يبيّن عملية عظيمة تحدث في أثناء التطور.(74)

(74) الجينات متماثلات المحتوى هي حالة أخرى من العائلات الجينية التي نشأت عن طريق تضاعف الجينات. للاطلاع على وجهات نظر مختلفة حول الآليات وتأثير هذا التضاعف، راجع:

P. W. H. Holland, "Did Homeobox Gene Duplications Contribute to the Cambrian Explosion?," Zoological Letters 1 (2015): 1–8; G. P. Wagner et al., "Hox Cluster Duplications and the Opportunity for Evolutionary Novelties,"

وكما رأى أونو، يمكن أن تكون النسخ وسيلة للابتكار. وقد أجرى زميلي مانيوان لونج في شيكاغو أبحاثًا على ذباب الفاكهة لتقدير كيفية ظهور الجينات الجديدة في الأنواع المختلفة. استخدم يونج تسلسلات الجينوم التي كانت متوافرة لأنواع مختلفة من الذباب منذ فترة طويلة. هناك أكثر من خمسمائة جين جديد تختلف بين الأنواع المختلفة، أي: حوالي 4٪ من الجينوم بأكمله. وفي حين أن بعضها جاء نتيجة عمليات لمَّا نفهمها بعد، فإن معظم الجينات الجديدة ظهرت كنسخ مكررة من الجينات القديمة. لماذا تبتكر من الصفر إذا كنت تستطيع أن تُقلد؟(75)

حتى أن نسخ الجينات يمكن أن يصبح أمرًا شخصيًّا.

الأدمغة الكبيرة:

من السمات البشرية المميزة هي أدمغتنا الكبيرة مقارنة بأقاربنا من الرئيسيات، ومن الواضح أن معرفة الأساس الجيني لأصلها من شأنه أن يخبرنا كيف نشأ التفكير والكلام والعديد من قدراتنا

Proceedings of the National Academy of Sciences 100 (2003): 14603–6; and N. Soshnikova et al., "Duplications of Hox Gene Clusters and the Emergence of Vertebrates," Developmental Biology 378 (2013): 194–99.

(75) وصفت مجموعة معمل مانيوان لونج عملها على أصل الجينات الجديدة في:

W. Zhang et al., "New Genes Drive the Evolution of Gene Interaction Networks in the Human and Mouse Genomes," Genome Biology 16 (2015): 202–26.

أصل الجينات الجديدة هو مجال نشط للبحث. في حين أن العديد من الجينات الجديدة تنشأ عن طريق تضاعف الجينات، فإن البعض الآخر لا يفعل، ولا تزال آليات ذلك قيد البحث النشط. للاطلاع على نموذج مع المراجع، انظر:

L. Zhao et al., "Origin and Spread of De Novo Genes in Drosophila melanogaster Populations," Science 343 (2014): 769–72.

الفريدة الأخرى. وبالحكم من السجل الأحفوري، فإنَّ حجم الدماغ قد تضاعف ثلاث مرات تقريبًا عن حجم أسلافنا من القردة الجنوبية australopithecine قبل ثلاثة ملايين سنة. توسع الدماغ في مناطق محددة، أبرزها ما يسمى بـ: «المنطقة القشرية للدماغ الأمامي»، المسؤول عن: الأفكار، والتخطيط، والتعلّم.

يُظهر السجل الحفريّ أن توسع الدماغ كان مرتبطًا بتغيرات أخرى، أبرزها التعقيد الجديد في نوع الأدوات التي صنعها أسلافنا واستخدموها. والآن تظهر على الساحة تقنيّة الجينوم، وتفتح أفقًا جديدًا، ألا وهو: فهم الجينات التي تجعلنا بشرًا.

إحدى الطرق هي مقارنة جينوم البشر والشمبانزي. ستحصل في النهاية على قائمة من الجينات التي يملكها البشر ولا يملكها الشمبانزي. وفي حين أن هذه القائمة قد تكون مفيدة، فإنها لن تُفصح شيئًا عن أي الجينات هي المهمة في نشأة الدماغ البشري. فقد ترتبط الاختلافات بأي سمة تفصل البشر عن الرئيسيات الأخرى، أو لا ترتبط بأي سمات على الإطلاق.

إحدى الطرق لحل هذه المشكلة تبدو كما لو أنها جاءت من الخيال العلمي: زراعة المخ في طبق. حتى الاسم، أورجانويد [شبه العضو]، له هذا النغمة. والفكرة هي أخذ خلايا دماغية من حيوان في طور النُّمو، ووضعها في طبق، ومعرفة الظروف التي تسهم في تكوين بنية الدماغ. من الأسهل بكثيرٍ دراسة الأنسجة في طبق مقارنةً بدراستها في الجنين، خاصة في الثدييات، حيث معظم النُّمو يحدث في الرحم.

قارن فريق في كاليفورنيا أورجانويد الدماغ لدى البشر وقرود مكّاك ريسوس، ووضعوا قوائم بجميع الاختلافات. في الطبق، تشكلت نسخة من المنطقة القشرية الفريدة في البشر في الأورجانويد البشري، ولكن ليس في أورجانويد القرد. نظر الباحثون في الجينات، فكانت نشطة عندما تشكل هذا النسيج. وكان هناك جين واحد نشط في كل خلية بشرية، ولكنه غير موجود في أنسجة القرد. قد يبدو الاسم نوتش تو إن إل NOTCH2NL طويلًا، ولكنه مهم في قصتنا.

وفي الوقت ذاته، كان هناك مختبر على بُعد ستة آلاف ميل في هولندا يتمتع بإمكانية الحصول بشكلٍ استثنائي على أنسجة دماغ الجنين البشري من حالات الإسقاط وعمليات الإجهاض الضرورية طبيًّا. كان ذلك النسيج فريدًا من نوعه، حيث إنه جاء من الأجنّة في المرحلة التي كان الدماغ يتشكل فيها. فحص الباحثون الجينات النشطة في الدماغ، ووجدوا عددًا صغيرًا منها يملك المواصفات الصحيحة ليدخل في تكوين الدماغ، فكان ينشط في الوقت المناسب في أثناء النُّمو، وكان فاعلًا في صنع البروتينات. وأحد هذه الجينات هو نوتش تو إن إل، وهو الجين الذي اكتُشف في تجارب الطبق.

ازدادت نكهة الخيال العلمي في البحث أكثر عندما أخذ الفريق الهولندي الجين البشري نوتش تو إن إل ووضعوه في فأر. لقد صنعوا خَيمَرًا من الفأر والإنسان. وكانت النتيجة فأرًا به عدد أكبر من خلايا الدماغ القشرية، مثلما يحدث في الإنسان إلى حدٍّ كبير.

ثم نظر فريق كاليفورنيا في الجينوم، وقارنوا جينوم البشر، والنياندرتال، والرئيسيات. ووجدوا أن الجين نوتش تو إن إل كان

واحدًا من ثلاثة جينات تعمل في أدمغة الإنسان، وكانت جميعها مشابهة لجين واحد، هو نوتش، المنتشر في كل شيء من الذباب إلى الرئيسيات، ويشارك في تطوير العديد من الأعضاء المختلفة. كيف ظهرت جينات الدماغ البشري الثلاثة؟ لقد ظهرت عن طريق نسخ جين نوتش البدائي من أسلاف الرئيسيات. وبمجرد نسخها، اكتسبت النسخ وظائف جديدة.

لا يساعد نسخ الجينات في تفسير الماضي فحسب، بل إنها تؤثر في الحاضر. توجد نسخ جين نوتش الثلاثة المكررة ملتصقة طرفًا إلى طرف في الجينوم البشري. هذا التركيب يجعل الامتداد غير مستقر، ويمكن تفكيكه عند نسخ الجينات في أثناء انقسام الخلايا. الفواصل هي الأماكن التي يمكن أن يتفكك عندها الكروموسوم. وتؤثر هذه التغييرات في وظيفة الجينات والدماغ. عندما تنقسم الخلايا، يمكن أن يتكرر الامتداد أو أن يُحذف. مَن تتكرر لديهم الجينات، يكبروا لتكون لديهم أدمغة أكبر، ومن تحدث عندهم عمليات حذف تكن أدمغتهم أصغر. وفي حين أن بعض الأفراد الذين يعانون من هذه التغيرات الجينية تكون وظائفهم الدماغية طبيعية، فإن معظمهم تظهر عليهم أعراض الفصام والتوحد.

ومن الواضح أن نوتش تو إن إل ليس الجين الوحيد الذي يشارك في تكوين الأدمغة الكبيرة. ولكن كما يظهر هذا البحث، فإن الجينوم لدينا مليء بالتكرارات، وعائلات الجينات، وأنواع مختلفة من النسخ، وهذه التكرارات يمكن أن تكون وقودًا للابتكار والتغيير.[76]

---

(76) كان مسار إشارات نوتش وتضاعف الجينات في تطور الدماغ موضوع ورقتين بحثيتين منشورتين بشكلٍ مستقل:

نُسخ خرجت عن السيطرة:

كان العلم يجري في حمض روي بريتن النووي. وُلِد عام 1912، ونشأ بين أبوين في تخصصات علمية مختلفة، ثم اتجه إلى الفيزياء، حتى حصل على وظيفة في مشروع مانهاتن خلال الحرب العالمية الثانية. وفي كل عام، كانت نزعته السلمية تتزايد، وكان يتوق إلى وظيفة جديدة. وفي النهاية وجد واحدة، وعمل في مختبر للجيوفيزياء في واشنطن العاصمة. بعد اكتشاف بنية الحمض النووي في عام 1953، وبحثه الدائم عن مغامرات فكرية جديدة، حصل بريتن على دورة تدريبية قصيرة عن الفيروسات في مختبر كولد سبرينج هاربور في نيويورك. مستعينًا بهذه المعرفة ورؤيته للحمض النووي عالمًا جديدًا، شرع في دراسة بنيته.

كانت المشاكل التي واجهت بريتن تتعلق بفهم عدد الجينات الموجودة في الجينوم وكيفية تنظيمها. تلك الأيام كانت قبل اكتشاف سَلسَلة الجينوم، وكان تنظيمه لغزًا في معظمه، ولأنه كانت تعوزه أجهزة سَلسَلة الجينات، كان على بريتن، مثل أونو من قبله، أن يبتكر بعض الحيل التجريبية الذكية.

على غرار أونو، كان لدى بريتن حدس بأن الجينوم يتألف من أجزاء مكررة، فصمم تجربة ذكية لمعرفة مقدار الجينوم الذي يتألف

I. T. Fiddes et al., "Human-Specific NOTCH2NL Genes Affect Notch Signaling and Cortical Neurogenesis," Cell 173 (2018): 1356–69; and I. K. Suzuki et al., "Human-Specific NOTCH2NL Genes Expand Cortical Neurogenesis Through Delta/Notch Regulation," Cell 173 (2018): 1370–84.

من نسخ بالتقريب. فاستخرج الحمض النووي من خلايا مخلوقٍ ما، ثم سخنه، ما أدى إلى تكسير شريط الحمض النووي إلى آلاف القطع الأصغر. وبتغيير الظروف، سمح للشريط بالعودة للتجمع ثانية. وكانت الحيلة هي قياس مدى سرعة تجمع الأجزاء المختلفة معًا في شريط واحد جديد. لقد توقع أن السرعة التي يُعاد بها تجميع الحمض النووي ستعطيه فكرة عن عدد العناصر المكررة الموجودة في الجينوم. والسبب؟

نظرًا لكيمياء جزيء الحمض النووي، فإن «الطيور على أشكالها تقع» بسرعة أكبر من غيرها، فالجينوم المكون من أجزاء متكررة، متشابهة، يجب أن يتجمع بسرعة أكبر من الجينوم المكون من أجزاء أقل تكرارًا.

أجرى بريتن حساباته الأولى على الحمض النووي من عجل وسمكة سلمون، ثم وسع المقارنة لتشمل أنواع أخرى. وبالرغم من أنه توقع العثور على الكثير من التكرارات في الجينوم، فقد صُدم من النتائج التي توصل إليها. ووفق تقديراته، فإن حوالي 40٪ من جينوم العجل يتألف من تسلسلات متكررة. وفي السلمون اقتربت النسبة من 50٪، كان العدد الهائل من التكرارات في كل جينوم مفاجئًا بقدر انتشارها في الأنواع المختلفة. كان الحمض النووي الذي فكّكه وأعاد تجميعه يحتوي عددًا هائلًا من العناصر المتكررة بداخله في كل الحيوانات تقريبًا. وباستخدام التقنيات الأولية المتاحة له في ذلك الوقت، قدّر أن بعض العناصر تحتوي أكثر من مليون نسخة في الجينوم.

إن قدوم مشاريع الجينوم يعني أنه يمكننا رؤية التسلسلات المحددة التي تكررت في الجينوم، وتُظهر الجهود المبكرة التي بذلها بريدجز وأونو وبريتن بدقة أفضل. توجد قطعة تسمى: «ألو ALU»، يبلغ طولها حوالي ثلاثمائة قاعدة، في جميع الرئيسيات. يتألف 13٪ من الجينوم البشري من تكرارات ألو. وهناك جزء قصير آخر، هو لاين 1 LINE1، يتكرر مئات الآلاف من المرات في الجينوم البشري، ويشكل 17٪ منه. نهاية القول، يتألف أكثر من ثلثي الجينوم بأكمله من سلاسل من النسخ المتكررة من التتابعات دون وظيفة معروفة. لقد أصيبت عملية النسخ في الجينوم بنوعٍ من الجنون.

نشر روي بريتن أبحاثًا علمية وهو في التسعينيات من عمره، حتى وفاته بسرطان البنكرياس في عام 2012. وقبل عام واحد من وفاته، نشر بحثًا به نتائج جديدة في مجلة الأكاديمية الوطنية للعلوم تحت عنوانٍ كان أونو سيبتسم لو قرأه: «كل الجينات البشرية تقريبًا نشأت عن طريق التكرار».[77]

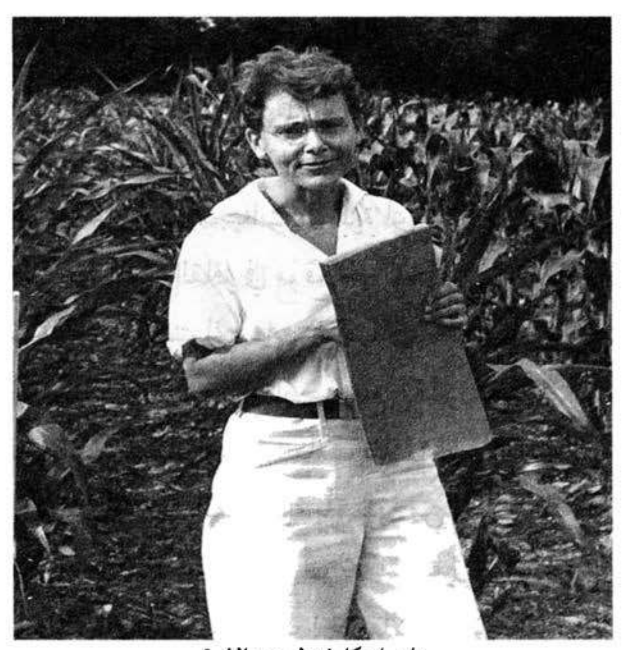
(77) سرد حياة روي بريتن مساعده فترة طويلة إيريك ديفيدسون في:
Eric Davidson, "Roy J. Britten, 1919–2012: Our Early Years at Caltech," Proceedings of the National Academy of Sciences 109 (2012): 6358–59.
نشر ديفيدسون وبريتن معًا ورقة بحثية تأملية حول معنى هذه التسلسلات التي كانت سابقة لعصرها بكثير، وأدت إلى أبحاث تبناها جيل من العلماء:
R. J. Britten and E. H. Davidson, "Repetitive and Non-Repetitive DNA Sequences and a Speculation on the Origins of Evolutionary Novelty," Quarterly Review of Biology 46 (1971): 111–38.
ورقة بريتن التي تصف التكرارات والتقنيات التي استخدمها للعثور عليها هي:
R. J. Britten and D. E. Kohne, "Repeated Sequences in DNA," Science 161 (1968): 529–40.
هناك ترجمة أبسط للعمل وسياقه في:

الجينات السخيفة:

بدأت باربرا مكلينتوك (1902-1992) مسيرتها المهنية وهي ترغب في السير على خطا توماس هنت مورجان لفهم أساس علم الوراثة، ولكن للأسف عندما التحقت مكلينتوك في جامعة كورنيل، لم يكن مسموحًا للنساء بالتخصص في علم الوراثة، لذا فقد التحقت بتخصص البستنة «المقبول للسيدات». لكن مكلينتوك كانت صاحبة الكلمة الأخيرة. ووصلت إلى الانضمام إلى الفريق الذي فتح آفاقًا جديدة في دراسة جينات الذرة.

كان للذرة، بصفتها موضوعًا للدراسة، ميزة واضحة على ذباب مورجان. إذ يمكن أن يحتوي الكوز الواحد من الذرة ما يصل إلى ألف ومائتي حبة. عرفت مكلينتوك أنها مثالية لدراسة علم الوراثة؛ لأن كل حبة هي جنين منفصل، وفرد متميز. في المرة القادمة التي تأكل فيها كوز ذرة، تخيل أنك تأكل أكثر من ألف مخلوق متميز وراثيًّا. وبالنسبة لمكلينتوك، أصبح كل كوز ذرة بمثابة محضن يمكنها من خلاله استكشاف علم الوراثة. وفوق ذلك، للذرة أصناف عدة، ذات حبات بألوان مختلفة من الأبيض إلى الأزرق إلى المرقط. ويمكن أن يكون كوز واحد من الذرة أساسًا لتجربة لتتبع آلاف الأفراد، وبالإمكان أن تكون التجارب سريعة ورخيصة وغنية بالبيانات.

R. Andrew Cameron, "On DNA Hybridization and Modern Genomics," at https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/ 10.1002/mrd.22034.



باربرا مكلينتوك مع الذرة

بدأت مكلينتوك عملها بنفس الطريقة التي بدأ بها فريق مورجان، أي: تطوير تقنيات لرؤية الكروموسومات. ومن خلال معالجة الذرة بعددٍ من الصبغات، تمكنت من رسم خريطة لمناطقها بقدرٍ كبير من التفصيل باستخدام الخطوط الفاتحة والداكنة. ثم ساعدها الحظ. لقد وجدت منطقة على كروموسوم الذرة تتفكك عندها الكروموسومات ببساطة، كما لو كان هناك خلل هيكلي ما في تلك البقعة المحددة. وبالتركيز عليها، رسمت خريطة لتلك المنطقة بتفصيلٍ كبير في حبات مختلفة من الذرة. ولدهشتها، وجدت أن نقطة الانفصال تتنقل حول الجينوم. كانت تلك الفكرة وحدها إحدى الرؤى العظيمة في تاريخ علم الجينات: الجينوم ليس ثابتًا، بل

تستطيع الجينات القفز من مكانٍ إلى آخر.

ولم تتوقف مكلينتوك عند هذا الحد. ولأنها باحثة متأنية وشاملة، امتنعت عن إخبار العالم بهذا الاكتشاف حتى تتقصى آثاره، وتساءلت: هل كان للجينات القافزة أي تأثير في الحبات نفسها؟ وماذا لو حطّ الجين القافز في موقع جين آخر؟

استخدمت مكلينتوك سمات خاصة في حبات الذرة للعثور على الإجابة، تتألف الصبغة الخارجية مع تكاثر الخلايا. تبدأ بخلية واحدة تنقسم باستمرار، وإذا كانت تلك الخلية البادئة بِلون محدد، مثل: الأرجواني، ستتألف الحبة بأكملها من الخلايا المنحدرة منها، وجميعها أرجوانية. لكن تخيل أن يحدث تغيّر جيني لخلية واحدة خلال تلك العملية، فيكتسب الجين الأرجواني طفرة. لن تكون الخلايا الوليدة من تلك الخلية بعينها أرجوانية، بل ستكون باللون الأساسي، وعادةً ما يكون الأبيض.

تستمر تلك الخلية البيضاء في الانقسام لإنتاج مجموعة من الخلايا البيضاء، وستكون النتيجة النهائية حبة أرجوانية في معظمها وبها بقعة بيضاء.

ومن خلال تتبع بقع الألوان المختلفة في كل حبة، تمكنت مكلينتوك من معرفة أين ومتى تحدث الطفرات في الجينات الموجودة بداخلها، وأمكنها أن تنظر إلى الطفرات في كل حبة وتكرر ذلك مع الآلاف منها في كل كوز.

درست مكلينتوك مئات الآلاف من الحبوب، واستنبتت الذرة لإنتاج ألوان مختلفة بأنواع مختلفة من البقع. ووجدت أن الطفرات

في الألوان يمكن تشغيلها وإيقافها، ثم تشغيلها مرة أخرى. من خلال دراسة الكروموسومات، مثلما فعل بريدجز ومورجان، اكتشفت أن الطفرات حدثت عندما قفزت منطقة نقطة انفصال الكروموسومات وهبطت داخل جين الصبغة. وعندما تدخل في الجين الصبغي، فإنَّها تفسده، فلا يُصنّع الصبغة بعدها. وعندما تقفز خارجه، يُصنّع الصبغة مرة أخرى. كان جينوم الذرة مليئًا بالجينات التي كانت تصنع نسخًا من نفسها، وتقفز، وبهذا القفز تصنع بقعًا ملونة مختلفة.

وبعد أن أمضت عقودًا من الزمن في هذا العمل، قدمت مكلينتوك فكرتها عن القفز الجيني في محاضرة في مختبر كولد سبرينج هاربور الذي كانت تعمل فيه. لم يعرها الخبراء الذين اجتمعوا أي اهتمام، ولم يفهمها الناس، ولم يصدقوها، أو اعتقدوا أن اكتشافها كان مجرد شيء غريب يتعلق بالذرة. وصفت مكلينتوك رد فعلهم، فقالت: «لقد ظنوا أنني مجنونة، مجنونة تمامًا».

ظلت المشكلة قائمة لعقود، لكن ذلك لم يردع مكلينتوك، إذ رسمت خرائط للجينات القافزة في الآلاف من كيزان الذرة، وكان موقفها في ذلك الوقت: «إذا كنت تعلم أنك على حق، فلا تهتم، وأنت تعلم أنه عاجلًا أو آجلًا، ستظهر الحقيقة».

ثم وجدت مختبرات أخرى، في عام 1977، أدلة على وجود جينات قافزة في البكتيريا، وفي الفئران - وفي الواقع في كل الأنواع التي فُحصت، وظهرت مفاجأة أخرى من خلال النظر إلى الجينات نفسها، لقد استولت الجينات القافزة على الجينوم، حيث يتألف

حوالي 70٪ منه منها. الجينات القافزة هي القاعدة وليست الاستثناء. تلك الأجزاء المتكررة بشكلٍ كبير في الجينوم، ألو ولاين1 التي تتكرر إلى حد أن هناك ملايين النسخ منها، هي جينات قافزة تصنع نسخًا من نفسها وتغرس نفسها في أنحاء الجينوم. وهي التي رآها روي بريتن في تجاربه الأنيقة، البسيطة، في الستينيات.

فازت مكلينتوك بجائزة نوبل في الفسيولوجيا أو الطب عام 1983 لاكتشافها. وقبلها في عام 1970، قدم لها الرئيس ريتشارد نيكسون الوسام الوطني للعلوم. خلال الحفل، قدم نيكسون فكرة مشوشة إلى حدٍّ ما عن المشروع العلمي، ولكنه بالرغم من ذلك اعترف بفضلها: «لقد قرأت [تفسيراتٍ لإنجازك العلمي]، وأريدك أن تعلمي أنني لا أفهمها»، وواصل: «لكنني أريدكِ أن تعلمي أيضًا لأنني لا أفهمها، فإنني أدرك مدى أهمية ما أسهمت به لهذه الأمة. وتلك، بالنسبة لي، هي طبيعة العلم».(78)

الجينوم ليس كيانًا عتيقًا وثابتًا، بل يفور الجينوم بالنشاط. ويمكن

---

(78) وُصف اكتشاف مكلينتوك للجينات القافزة لأول مرة في:

Barbara McClintock, "The Origin and Behavior of Mutable Loci in Maize," Proceedings of the National Academy of Sciences 36 (1950): 344–55.

للاطلاع على احتفاء متأخر وشرح للورقة البحثية، انظر:

S. Ravindran, "Barbara McClintock and the Discovery of Jumping Genes," Proceedings of the National Academy of Sciences 109 (2012): 20198–99.

حول اكتشاف الجينات القافزة وعملها، انظر:

L. Pray and K. Zhaurova, "Barbara McClintock and the Discovery of Jumping Genes (Transposons)," Nature Education 1 (2008): 169.

يوجد لدى المكتبة الوطنية للطب مستودع على الإنترنت لأوراق مكلينتوك، بما في ذلك اقتباساتها الواردة هنا واقتباس نيكسون في حفل الميدالية الوطنية:

https://profiles.nlm.nih.gov/ps/retrieve/Narrative/LL/p-nid/52

أن تتضاعف الجينات، بل يمكن نسخ الجينوم بأكمله. وتستطيع الجينات أن تصنع نسخًا من نفسها وأن تقفز حول الجينوم.

تخيل نوعين من الجينات في الجينوم: بعضها له وظيفة ويصنع البروتين، والبعض الآخر يعيش فقط ليقفز ويصنع نسخًا من نفسه. ماذا سيحدث مع مرور الوقت؟ إذا استثنينا العوامل الأخرى، فإن الجينات الناسخة سوف تشغل أجزاء أكبر من الجينوم. وهذا هو أحد الأسباب التي تجعل ثلثي الجينوم عندنا يتألف من تسلسلات متكررة، مثل: لاين1 وألو، وإذا لم يوجد ما يكبحها، فسوف تسود. الشيء الوحيد الذي يوقف هذه الطفيليات هو أنها إذا خرجت عن نطاق السيطرة تمامًا، فقد تتسبب في وفاة مضيفها، وبمرور الوقت، ستموت هي أيضًا. والأفراد الذين يحملون جينات قافزة غير خاضعة للسيطرة تمامًا سوف يموتون، ولن ينقلوها. الجينات الأنانية ومضيفوها في حالة توتر، حتى إنهم في حالة حرب فيما بينهم، حيث تعيش الجينات الأنانية فقط لتنسخ نفسها، بينما يكافح الجينوم المضيف لاحتوائها.

وكما كانت الحال في شركة آبل في عهد ستيف جوبز، فإنَّ التقليد هو أبو الابتكار، والانتحال في الجينوم مصدر عدد لا يُحصى من الابتكارات الجينية. ومثلما يحدث في: التقنيّة، والأعمال، والاقتصاد، كما يمكن أن يؤدي الاضطراب إلى الثورة. لقد تعرضت الخلايا الحيوانية للاضطرابات لمليارات السنين، وكما سنرى، يمكن أن ينتج عن هذه التغييرات طرق جديدة تمامًا للحياة.

الفصل السادس

ميدان معاركنا الداخلية

بدأت بذرة عملي في أحد الطقوس الأسبوعية التي كنت أؤديها عندما كنت طالب دراسات عليا في الثمانينيات.

في صباح كل يوم خميس، كنت أصعد خمسة طوابق على السلالم لأصل إلى مساحة تخزين كبيرة في متحف علم الحيوان المقارن في جامعة هارفارد. كانت تلك المساحة مكان تخزين مجموعات الطيور، وكانت أرضياتها خشبية وسقفها بارتفاع عشرين قدمًا، وكانت الجدران مُغطاة بخزائن ورفوف مليئة بالهياكل العظمية والريش والجلود التي جُمعت خلال البعثات الاستكشافية في القرنين التاسع عشر والقرن العشرين. وكانت رائحة كرات النفتالين التي تحمي الجلود تتغلغل في الهواء. كان التاريخ أيضًا يتغلغل في المكان، سواء أكان تاريخ علم الطيور أم العلوم ككل. وكان هذا الارتباط بالماضي هو ما شدّني: كانت رحلاتي تلك لألتقي أمين متحف الطيور المتقاعد إرنست ماير البالغ من العمر ثمانين عامًا.

بحلول منتصف الثمانينيات، كان ماير من بين آخر الأعضاء الأحياء في جيل من علماء الوراثة، وعلماء الحفريّات، وخبراء التصنيف الذين حددوا شكل مجال علم الأحياء التطوري في

منتصف القرن العشرين. وكان دور ماير في هذا الإنجاز العلمي هو تأليف أحد الكتب الكلاسيكية في ذلك الوقت، وهو «أنواع الحيوانات وتطورها»، وهو مجلد ضخم أرشد أبحاث جيل من العلماء حول تكوّن الأنواع الجديدة.[79]

كنت أحضر كل أسبوع ومعي سؤال، وأشارك الرجل العظيم إبريق شاي وهو يتحدث عن تاريخ هذا المجال، ويقدم آراء مليئة بالحيوية حول الأفكار والشخصيات التي شكلته.

قبل كل زيارة، كنت أنقّب في المؤلفات لآتي بموضوع جيّد ليكون بمثابة مادة تستحث ذكرياته، ولقد شعرت بأنني محظوظ للغاية؛ لأنني حصلت على مثل هذا التشجيع الرائع في بداية مسيرتي المهنية.

في أحد أيام الخميس جئت ومعي كتاب: «**الأساس المادي للتطور**» من تأليف العالم الألماني ريتشارد جولدشميت،[80] وهو عبارة عن طبعة جديدة ذات غلاف عادي لمجلد نُشر لأول مرة في عام 1940. وعندما عرضته على ماير، رأيت وجهه يتحول إلى الأحمر الأرجواني وكادت عيناه تخترقاني بنظرة جليدية. نهض، ووقف ساكنًا، وكأنه لم يعد يراني لفترة بدت كأنها اللانهاية. لقد

---

(79) كتاب إرنست ماير الكلاسيكي هو "أنواع الحيوانات وتطورها":
Animal Species and Evolution (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1963).

(80) كتاب ريتشارد جولدشميت هو **الأساس المادي للتطور** (New Haven, CT: Yale University Press, 1940). والورقة التي أثارت غضب ماير هي: "التطور كما يراه أحد علماء الوراثة".
"Evolution as Viewed by One Geneticist," American Scientist 40 (1952): 84–98.

تجاوزت بعض الحدود الخفية، وكنت متأكدًا تمامًا من أنني أستطيع أن أودّع شاي يوم الخميس.

مشى ماير صامتًا نحو خزانة ملفات خشبية قديمة وفتش في محتوياتها، ثم عاد بطبعة مصفرة لإحدى أوراق جولدشميت، وضرب المقال على الطاولة قائلًا: «لقد كتبت كتابي ردًّا على الهراء الذي جاء في الجملة الأولى من فقرة قُرب نهاية هذا». عملًا بما أشار إليه، تصفحت المقال حتى وصلت إلى الصفحة 96. كان يُصعّب الفقرة، فكانت هناك ملاحظات غاضبة في الهوامش أكثر من النص الأصلي.

لقد مرت ثلاثة عقود ونصف بين نشر مقال جولدشميت والغضب الذي أبداه ماير. كيف يمكن لجملة واحدة، ناهيك عن فكرة، أن تحرك مثل هذا الشغف وتحفز إنتاج كتاب من 811 صفحة كان في حد ذاته بمثابة نقطة انطلاق لمهن بحثية كاملة؟(81)

كان النقاش حول كيف يمكن للتغيرات في الجينات أن تؤدي إلى ابتكارات جديدة في تاريخ الحياة، وكان الرأي التقليدي هو أنَّ الابتكارات تظهر تدريجيًّا مع مرور الوقت ومع التغييرات الجينية الصغيرة في كل خطوة. وقد دعمت هذه الفكرة مجموعة كبيرة من الأبحاث النظرية والمختبرية إلى حد أنها عدّت تقريبًا بدهية. وقد

(81) يُعرف العصر الذي أنتج فيه ماير أعماله الرئيسة باسم زمن التوليف التطوري، وبلغ ذروته في أواخر الأربعينيات، عندما دُمجت النتائج المستخلصة من علم الجينات في مجالات: التصنيف، وعلم الحفريات، والتشريح المقارن. في أثناء لقاءات الشاي، تحدث ماير كثيرًا عن توليف جديد تمامًا يلوح في الأفق في التسعينيات، وهو توليف من شأنه أن يوسع عمل جيله ليشمل البيولوجيا الجزيئية وعلم الجينات التطوري. وبناءً على ذلك، شجع طلاب الدراسات العليا في دائرته على مواكبة تلك المؤلفات العلمية.

اشتقها عالم الإحصاء البريطاني السيد رونالد أ. فيشر رياضيًّا في عشرينيات القرن الماضي في أثناء محاولته ربط مجال علم الجينات الناشئ بالتطور الدارويني. جزء من هذا المنطق يكمن في فكرة أنك إذا أحدثت تغييرًا عشوائيًّا على النظام، فالأرجح أن تكون التغييرات الكبيرة سيئة، وكثيرًا ما تكون كارثية، مقارنة بالتغييرات الأصغر.[82]

خذ على سبيل المثال: الطائرة. من المؤكد أن أي تغيير عشوائي يبتعد بشكلٍ كبير عن المعايير سيؤدي إلى طائرة لا تطير، فتغيير شكل الجسم عشوائيًا، أو موضع المحركات، أو هيكلها، أو شكلها، أو ترتيب الأجنحة من المحتمل أن يؤدي إلى مسخ لا يتحرك. أمّا التعديلات الصغيرة، مثل: لون المقاعد أو التعديلات الطفيفة في الحجم، فمن غير المرجح أن تكون وخيمة. والواقع، إن فرصتها في تحسين الأداء أكبر من فرصة التغييرات الكبيرة، ولو بشكل هامشي. لقد هيمن هذا النوع من التفكير على مجال علم الأحياء التطوري لسنوات، إلى درجة أن تحديه كان أقرب إلى إنكار أن الجاذبية هي سبب سقوط التفاح من الأشجار.

دخل جولدشميت، وهو لاجئ من ألمانيا النازية، المجالَ الأكاديمي في الولايات المتحدة بعد أن درس الطافرات لعقود من الزمن. وبانتقاله إلى أمريكا الشمالية، دخل حفلة علم الوراثة دون دعوة، وغير مُبالٍ بالوضع القائم. كان معجبًا بالطافرات ذات

(82) كان كتاب رونالد فيشر ذو التأثير الهائل هو: "النظرية الجينية للانتقاء الطبيعي":

.The Genetical Theory of Natural Selection (London: Clarendon Press, 1930)

الرأسين أو أجزاء الجسم المكررة، مثل التي اكتشفها كالفن بريدجز، واعتقد أن تحولًا كبيرًا يمكن أن يحدث في خطوة واحدة نتيجة طفرة دراماتيكية واحدة، وقد تجسدت الدراما في هذه الفكرة في واحدة من أشهر عبارات جولدشميت، وهي ذاتها التي أغضبت ماير بشدة: «لقد فقس أول طائر من بيضة زاحف». لا تغيير تدريجي هنا – في نظرِه، تحدث الثورات البيولوجية بطفرة واحدة في جيلٍ واحد.

أُطلق على طافرات جولدشميت اسم: «المسوخ الواعدة». لقد كانت مسوخًا؛ لأنها تبتعد بشكلٍ كبير عن المعايير، وكانت واعدة؛ لأنها كانت بذور ثورة كاملة في تاريخ الحياة. في عالم النباتات، حيث يمكن للتغيرات في أعداد الكروموسومات أن تؤدي إلى ظهور أنواع جديدة دفعة واحدة، لم تكن فكرة جولدشميت مثار جدل. لكن بالنسبة للحيوانات، كانت الأمور مختلفة تمامًا.

كان الهجوم على فكرة جولدشميت فوريًا وعنيفًا. وكانت أبرز الانتقادات تتحدى فرصة أن يكون المسخ الواعد قادرًا على الحياة وأن يتكاثر بعد ذلك:

أولًا: ستحتاج الطفرة إلى إنتاج ذرية قادرة على الحياة وخصبة، وكان من المعروف جيدًا في ذلك الوقت أن معظم الطافرات، ناهيك عن الطافرات التي تظهر بصورة درامية، كانت إمّا عقيمة وإما أنها تموت قبل أن تتمكن من إنجاب ذرية. وحتى لو بقي الطافر على قيد الحياة وأصبح خصبًا، فإن مصيره سيظل غير مؤكد. لا يكفي أن يكون هناك طافر واحد فقط في الجماعة، بل يحتاج إلى العثور على رفيق يحمل الطفرة أيضًا. لكي يؤدي مسخ جولدشميت الواعد إلى

ثورة كبرى في خطوة واحدة، لا بد من وقوع سلسلة من الأحداث بعيدة الاحتمال: يجب أن تؤدي طفرة كبيرة إلى ظهور فرد بالغ قادر على الحياة، ويجب أن يحدث ذلك في الذكور والإناث في وقت واحد، وسيكون على بعض هؤلاء الأفراد أن يعثروا على بعضهم، وأن يتزاوجوا ويربوا نسلهم الذي يكون بإمكانه هو الآخر التكاثر.

وعندما بدأت درست علم الأحياء في السبعينيات، كانت سمعة جولدشميت تتراوح بين المنبوذ والمهرطق، بِعَدِّه شخصًا تجرأ على نشر وجهة نظر بيّنة الخطأ. وهو لم ينشرها فحسب، بل بدا كأنه يستمتع بدور المُخالف، فقضى العقود الأخيرة من حياته المهنية في الدفاع عن المسوخ الواعدة، وكثيرًا ما كان يُواجه بسخرية عامة.[83]

كان ماير وجولدشميت ومعاصروهم يناقشون إحدى القضايا المركزية في تنوع الحياة – وهي كيفية حدوث التغيرات التطورية الكبرى، وبالرغم من أنَّ مسوخ جولدشميت الواعدة كانت غير معقولة، فإن أسئلة ظلت مطروحة. لم تكن القضية في التغيير التدريجي، فقد عرف علماء الأحياء منذ زمن طويل أن التغيرات الجينية التدريجية الصغيرة يمكن أن تؤدي إلى ثورات هائلة على مدى ملايين السنين من الزمن الجيولوجي. لكنّ هناك لغزًا أعمق يظهر من السجل الحفريّ. خذ على سبيل المثال: نشوء الهيكل العظمي،

(83) للاطلاع على حياة جولدشميت، انظر:

Curt Stern, Richard Benedict Goldschmidt, 1878–1958: A Biographical Memoir (Washington, DC: National Academy of Sciences, 1967), at http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/goldschmidt-richard.pdf

وهو أحد أكبر الأحداث في تاريخ جنسنا البشري. لملايين السنين، عاش الأسلاف الشبيهون بالديدان دون عظام في أجسامهم. للعظم بنية مميزة، إذ يحتوي طبقات من الخلايا منظمة للغاية تُصنّع البروتينات والبلورات المميزة التي تمنح الهيكل العظمي صلابته وتنظم طرق نموه. سمح ظهور الهيكل العظمي لأسلافنا بأن يكبروا في الحجم، وأن تكون لديهم أجسام صلبة للعثور على الفرائس، وتجنُب الحيوانات المفترسة والانتقال.

نشأ هذا الابتكار بسبب ظهور نوع جديد من الخلايا يمكنها إنتاج البروتينات اللازمة لتكوين الهياكل العظمية وتغذيتها ومساعدتها في النُّمو. لكن أنواعًا مختلفة من الأنسجة - سواء أكانت جلدًا أم أعصابًا أم عظامًا - تصنعها خلايا تصنع مئات البروتينات المختلفة. تختلف الخلايا العصبية عن الخلايا الهيكلية؛ لأن العديد من البروتينات تمنحها القدرة على توصيل النبضات العصبية. وهذه، بالطبع، غير موجودة في الهيكل العظمي والخلايا التي تبنيه. وبالمثل، تتألف الغضاريف والأوتار والعظام من بروتينات لا تنتجها الخلايا العصبية. والهيكل العظمي ليس سوى مثال واحد، فتاريخ الحياة الحيوانية الذي يبلغ ما يقارب 600 مليون سنة يتضمن نشوء مئات الأنسجة الجديدة التي مكّنت لأساليب جديدة في: التغذية، والهضم، والحركة، والتكاثر.

وهنا يكمن التحدي: إن نشوء أنسجة وخلايا جديدة من أنسجة وخلايا الأسلاف يحتاج إجراء تغييرات على مئات الجينات. كيف يمكن أن تنشأ خلايا وأنسجة جديدة إذا كان لا بد من حدوث

العديد من الطفرات المنفصلة في وقت واحد في أنحاء الجينوم؟ إذا كانت احتمالات حدوث طفرة تدريجية واحدة صغيرة نسبيًّا، فتخيل استحالة حدوث المئات منها في وقتٍ واحد. سيكون هذا بمثابة الفوز بالجائزة الكبرى ليس فقط على عجلة روليت واحدة، ولكن على كل عجلة في الكازينو في الوقت ذاته.

حُبلى بالمعنى:

من الصعب أن تُخطئ تمييز فيني لينش زميلي من جامعة شيكاغو في صالة الألعاب الرياضية، فهو يحمل وشومًا لمجموعة من الأنواع على ذراعيه وساقيه، وهو يبرز حتى بين طلاب الجامعات الذين يغطي الوشم أجسادهم.

تعيش على أطرافه اليعاسيب ومشهد للأسماك في نهر.

مشهد النهر ذلك هو بمثابة إيماءة للنظام البيئي لنهر هدسون الذي غذّى حبه للعلوم في طفولته. كان قد نشأ في بلدة تقع على ضفافه، وقد نمى لديه شغف بالمخلوقات التي تعيش على حافة المياه، وقد نقله: التوثيق، والرسم، والقراءة عن الحيوانات المختلفة إلى عالم آخر. ولسوء الحظ، فإن فضوله عن تنوع الحياة لم يُترجم إلى نجاحٍ في المدرسة. لقد كان فاشلًا؛ لأنه، على حد وصفه، «لم يستمع إلى المحاضرات»، بل كان يحدق من النافذة إلى الطيور والحشرات.

ولحُسن الحظ، أدركت إحدى معلمات الأحياء أحلام يقظته وسمحت له بالجلوس في آخر الفصل ومعه كتب وأدلة ميدانية كانت تختبره فيها لاحقًا. تلك التجربة التي كانت إحدى المعلمات الحكيمات سببًا فيها دفعته إلى العمل في علم الأحياء. لقد أمضى

حياته منذ ذلك الحين في استكشاف كيفية حدوث التنوع الحيواني: ليس فقط كيف تعيش الحيوانات وتأكل وتتحرك، ولكن كيف نشأت على مدى ملايين السنين من أسلاف بعيدين. وتخصصه هو تطبيق التقنيّة المتطورة على تلك الأسئلة العميقة.

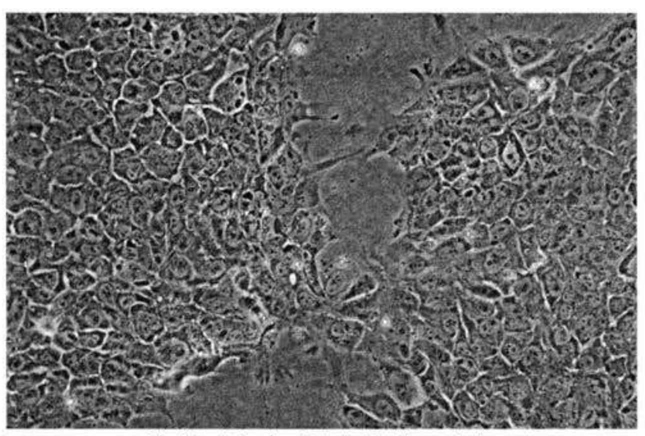
إن التقدم في علم الأحياء يتمثل في طرح السؤال الصحيح بقدر ما يتمثل في إيجاد نظام تجريبي لاستكشافه. وجد توماس هنت مورجان أدلة على الجينات في الذباب. وتوصلت باربرا مكلينتوك إلى فهم عمل الجينات في الذرة. أمّا فيني لينش، فيبحث عن أدلة على الثورات العظيمة في تاريخ الحياة في الخلايا السّدَويّة الساقطة Decidual Stromal Cells.

تتسع عيون لينش وهو يصف الخلايا السّدَويّة الساقطة. عندما تحدثنا عنها للمرة الأولى، قال بحماس شديد: إنها من «أجمل الخلايا في الجسم»، سأعترف أن ذلك الوصف يبدو مما قد يقوله مهاويس العلم، ولكن بمجرد أن رأيتها تحت المجهر، وافقته الرأي. تبدو معظم الخلايا مثل نقاط صغيرة منتظمة عند النظر إليها بقوة التكبير العالي. لكن ليس تلك الخلايا. بأجسادها الحمراء الكبيرة والأنسجة الضامة الغنية بينها، تبدو غَنّاء، إذا كان بالإمكان استعمال هذا المصطلح في وصف الخلايا.

وبالنسبة للينش، لا يتمثل جمال الخلايا السّدَويّة الساقطة في شكلها فحسب، بل هو جمال علمي أيضًا. إنها نافذة على أصل أحد الابتكارات العظيمة في تاريخ الحياة: الحَمْل. تفقس معظم: الأسماك، والطيور، والزواحف، وحتى الثدييات البدائية للغاية، من

البيض. وليس لديها نمط الحمل مثل الثدييات، حيث ينمو الجنين داخل الأم ويشاركها إمدادات الدم. كما أنها لا تملك الخلايا السّدَويّة الساقطة.

يبدو الحمل طبيعيًّا بالكامل وإعجازي تمامًا في آنٍ واحد. تناور الحيوانات المنوية في الرحم وقناة فالوب حتى تعثر على البويضة في النهاية، ثم يدخل حيوان منوي واحد (وفي حالات نادرة أكثر من واحد) إلى البويضة، ويطلق سلسلة من الأحداث التفاعلية، ثم يندمج جينوم الحيوان المنوي مع البويضة، ويشكل الاثنان خلية واحدة. ومع الوقت، يتألف من هذه الخلية جسم مؤلَّف من تريليونات من الخلايا موضبة جميعها في المكان الصحيح. تتشكل المشيمة والسرة لربط الأم والجنين الموجود في الرحم الذي يحميه. ولكي يتمكن الرحم من حمل الجنين، ينبغي بناء مجموعة من التراكيب الجديدة.



خلية جميلة: الخلايا السَدَوية الساقطة

يُحدث الإخصاب سلسلة من التغيرات في جسم الأم أيضًا.

تتشكل في الرحم خلايا متخصصة لربط الجنين بها، والتقريب بين إمدادات دمها ودم الجنين. تُخفي هذه الخلايا حقيقة أن الجنين كائن غريب داخل الأم، وبه إسهام من الجينات والبروتينات من الأب. هناك دائمًا خطر أن يبدأ الجهاز المناعي للأم مهمة بحث وتدمير للبروتينات الأبوية ويقتل الجنين.

تخفف خلايا متخصصة من تلك الاختلافات، والخلية التي تؤدي الجانب الأكبر من هذا السحر، بدءًا من تثبيط الاستجابة المناعية للأم وحتى توجيه العناصر الغذائية إلى الجنين، هي الخلية السّدَويّة الساقطة.

والمحفز الذي يصنع هذه الخلايا ويبدأ العديد من التغييرات في الرحم هو ارتفاع هرمون البروجسترون في مجرى دم الأم.

يرتفع هرمون البروجسترون شهريًّا في مجرى دم الأم، فيستعدّ الرحم للحمل، وعندما يلامس البروجسترون خلايا الرحم، فإنه يسبب تكاثرها وتغيرها، مما يجعل بطانة الرحم endometrium أسمك. تتسبب مستويات البروجسترون المرتفعة في تحول مجموعة من الخلايا المعروفة باسم الخلايا الليفية fibroblast إلى الخلايا السَدَويّة الساقطة. إذا لم يحدث الحمل في ذلك الشهر، يتخلص الرحم من الخلايا. ولكن إذا حدث الحمل، يبدأ المبيضان في إنتاج هرمون البروجسترون، وتستمر الخلايا والوسط الخلوي الغني الذي يبطن الرحم في النُّمو، وتتشكل الخلايا السّدَويّة الساقطة، وتبدأ في أداء عملها.

جاء افتتان لينش بهذه الخلايا من محاضرة علمية حضرها في تكساس عندما كان طالب دراسات عليا في جامعة ييل.

أظهر أحد الباحثين، وهو يتحدث عن الحمل، شرائح من الخلايا السّدَويّة الساقطة. علم لينش أنَّ تلك الخلايا لها خاصية مميزة، يمكنك صنعها في طبق. وجد الباحث أنه عندما أخذ الخلايا الليفية الطبيعية من أي مكان في الجسم، ووضعها في طبق بتري **petri**، وأضاف مزيجًا من البروجسترون وبعض المواد الكيميائية الأخرى، أمكنه تصنيع خلايا سَدَويّة ساقطة طبيعية. ولم يكن لينش يعلم حينها، وبمحض المصادفة، أن كل هذا العمل كان يجري في جامعة ييل في المبنى المجاور لمبناه.

تعلم لينش بسرعة كيفية صنع الخلايا السدَويّة الساقطة في بيئة المختبر المراقَبة، وأصبح بإمكانه فحص الجينوم الموجود بها لمعرفة كيف جاءت منذ ملايين السنين. وكانت تحت تصرفه تقنية جديدة قوية جدًّا، تقنية تستخدم أجهزةً لسَلسَلة الجينات سريعة بشكلٍ مذهل. وباستخدام هذه التقنية، تمكن من النظر إلى خليةٍ ما، أو إلى نسيج بأكمله، ورؤية تسلسل كل جين كان ينشط فيها - جميعًا في وقت واحد.

تأمل ما يمكن أن تفعله تقنية كهذه. إذا كانت الاختلافات بين الخلايا تنشأ من الجينات النشطة في كل خلية، فإن تحديد كوكبة الجينات التي تنشط في خلايا مختلفة يصبح جزءًا مهمًّا من السعي لفهم ما يميز خلية عن أخرى. لعلك تذكر أنَّ الخلية العصبية تختلف عن الخلية العظمية؛ لأنَّ الجينات المختلفة تصنع بروتينات مختلفة

داخل كل منها. وبالمثل، فإن الخلية السّدَويّة الساقطة تختلف عن الخلايا الليفية من حيث الجينات النشطة في كل منها. كان بإمكان لينش أن ينظر إلى إحدى الخلايا ويقارنها بأخرى ليطرح أسئلة جوهرية: ما الاختلافات في النشاط الجيني بين الخليتين؟ هل هناك جين واحد هو ما يجعلهما مختلفتين أم أن جينات عدة تعمل معًا، وإذا كانت الحال كذلك، فما تلك الجينات؟

أخذ لينش الخلايا الليفية، ووضعها في الطبق، وهاجمها بالبروجستيرون، وحولها إلى خلايا سَدَويّة ساقطة. ثم نظر إلى الجينات التي أصبحت نشطة، وكانت النتيجة مفاجئة بقدر ما كانت هائلة. لم يتضمن نشوء الخلايا السّدَويّة الساقطة تنشيط جين واحد، أو حتى مجموعة منها. بل نشطت مئات الجينات في الوقت ذاته.

الخلايا السّدَويّة الساقطة فريدة في الثدييات، ولا يوجد مخلوق آخر يملك نسخة منها. ونشوء هذه الخلايا هو جزء أساسي من نشوء الحمل نفسه. ولكن في ذلك تكمن المشكلة. إذا كان نشوء هذا النوع من الخلايا وحده يتضمن تنشيط مئات الجينات في الوقت ذاته، فكيف يمكن أن يحدث الحمل؟ سيحتاج ذلك أن تظهر مئات الطفرات في وقتٍ واحد في الجينوم بأكمله.

ولكي يجيب لينش على أسئلته، كان بحاجة إلى النظر في كل من تلك المئات من الجينات التي تصنع الخلايا السّدَويّة الساقطة.

لكي نستعرض خطوة لينش التالية، نحتاج إلى التوقف مؤقتًا والنظر فيما قد يجعل الجينات تنشط بهدف تحويل الخلية إلى خلية سَدَويّة ساقطة. لعلك تذكر أن هناك مفاتيح جزيئية في كل الجينوم

تعمل، في ظل الظروف المناسبة، على تشغيل الجينات أو إيقافها. وتقع معظم هذه المفاتيح جوار الجينات التي تنشطها. وبما أن البروجسترون هو المحفز لتكوين الخلايا السّدَويّة الساقطة، فبإمكاننا أن نفترض بشكل معقول أن المفاتيح تستجيب له. ستكون المفاتيح الجينية مرتبطة بتسلسل يتعرف على هرمون البروجسترون. وعندما يكون البروجسترون موجودًا، ينشط المفتاح ويصنّع الجين البروتين.

هذه الرؤية منحت لينش الأفكار التي كان يحتاجها لسبر الجينوم، فعليه أن يبحث عن الأمارات الدالّة على المفاتيح الجينية التي تحتوي، كجزء من تسلسلها، منطقة تتعرف على هرمون البروجسترون. سيكون ضمن هذه المنطقة تسلسل يمكن أن يرتبط به الهرمون، لذا، مع قليل من الحظ، يمكنه العثور عليه في مقارنة بين الجينات في قواعد بيانات الحاسوب.

وهذا بالضبط ما وجده. تقريبًا كل المئات من الجينات التي تصنع الخلايا السّدَويّة الساقطة لديها مفاتيح تستجيب للبروجستيرون، وعلى الرغم من أن هذا الاكتشاف مثير للاهتمام، فإنه لم يقدم سوى القليل للإجابة على السؤال الذي دفع لينش إلى الدخول في كل هذا في المقام الأول. بطريقةٍ ما، خلال نشوء الحمل، كان لا بد أن تنشط مئات الجينات استجابةً للبروجستيرون. وبما أن مئات الجينات تنشط استجابةً للبروجستيرون، فلا بد من وجود مئات المفاتيح التي تستجيب للبروجستيرون في الجينوم، قُرب كل الجينات التي ينشطها الهرمون. لم تكن تلك طفرةً بسيطة في الحمض النووي، مثل: تغيير

حرف واحد في الشيفرة. رأى لينش أمامه مجموعة من الحروف التي كان ينبغي أن تتغير في وقتٍ واحد في مئات الأماكن في الجينوم لتكوين خلايا سَدَويّة ساقطة. ما كان غير معقول أصبح مستحيلًا.[84]

وبعد أن جعلت كل تجربة جديدة أجراها نشوء الخلايا مستبعدًا أكثر وأكثر، عاد لينش إلى بنية المفاتيح الجينية نفسها، فربما هناك شيء ما يتشاركونه جميعًا يمكن أن يقدّم تفسيرًا؟ وبعد النظر إلى تفاصيل التسلسلات، استخدم خوارزمية حاسوبية لمعرفة ما إذا كان هناك أي نمط مشترك، فظهر تسلسل جيني بسيط، وهو تسلسل مشترك بين جميع المفاتيح تقريبًا. ومن خلال عرض التسلسل على قاعدة بيانات ضخمة لجميع التسلسلات المعروفة، وجد الإجابة: كل مفتاح جيني كان يحمل توقيعًا مميزًا لجينٍ قافز، وهو النوع من الجينات الذي اكتشفه مكلينتوك لأول مرة في الذرة. هذه الجينات، كما رأينا سابقًا، تصنع نسخًا من نفسها لإدخالها في أنحاء الجينوم. وقد رأت مكلينتوك أنها عوامل اختلال كبيرة، أي: إنها عندما تقفز وتنغمس في جين آخر، فإنها قد تُعطل وظيفة ذلك الجين وتسبب

---

(84) أوراق فنسنت لينش:

V. J. Lynch et al., "Ancient Transposable Elements Transformed the Uterine Regulatory Landscape and Transcriptome During the Evolution of Mammalian Pregnancy," Cell Reports 10 (2015): 551–61; and V. J. Lynch et al., "Transposon-Mediated Rewiring of Gene Regulatory Networks Contributed to the Evolution of Pregnancy in Mammals," Nature Genetics 43 (2011): 1154–58.

مرضًا. لكن لينش رأى شيئًا آخر.[85]

هذا الرابط البسيط جعل ابتكارًا معقدًا، كان يبدو مستحيلًا، يصبح ممكنًا. لم يكن من الضروري أن تتحور مئات الجينات بشكل مستقل. رأى لينش أن طفرةً حدثت في جين قافز واحد، فأدت إلى تحويل تسلسل عادي إلى مفتاح يستجيب للبروجستيرون. ثم انتشرت الطفرة عبر الجينوم، حيث تضاعف الجين القافز ومعه المفتاح، وقفز، وهبط في أماكن جديدة. نشرت الجينات القافزة المفاتيح في أنحاء الجينوم بسرعة كبيرة. وعندما تهبط جوار جين ما، يصبح من الممكن عندها تنشيط هذا الجين استجابةً للبروجستيرون. وبهذه الطريقة، اكتسبت مئات الجينات القدرة على أن تصبح نشطة في أثناء الحمل. إنَّ التغيير الجيني الذي يتضمن التنسيق بين مئات الجينات لا يحدث عن طريق مئات الطفرات المستقلة، ولكن يمكن أن يحدث عن طريق الجينات القافزة التي تحمل طفرة واحدة إلى أنحاء الجينوم. وبهذه الطريقة، يمكن أن تنتشر التغيرات الجينية بسرعة كبيرة، حيث تقفز الجينات، وتصنع نسخًا من نفسها، وتهبط

(85) استعرض لينش المشكلة في:

G. P. Wagner and V. J. Lynch, "The Gene Regulatory Logic of Transcription Factor Evolution," Trends in Ecology and Evolution 23 (2008): 377–85; and G. P. Wagner and V. J. Lynch, "Evolutionary Novelties," Current Biology 20 (2010): 48–52.

كانت ماكلينتوك بنفسها هي الملهم لهذا العمل، انظر:

B. McClintock, "The Origin and Behavior of Mutable Loci in Maize," Proceedings of the National Academy of Sciences 36 (1950): 344–55; and the seminal paper by R. J. Britten and E. H. Davidson, "Repetitive and Non-Repetitive DNA Sequences and a Speculation on the Origins of Evolutionary Novelty," Quarterly Review of Biology 46 (1971): 111–38.

في أماكن مختلفة.

الجينات القافزة هي العناصر الأشد أنانية – إذ يمكنها أن تتناسخ وتقفز لتنتشر وتتكاثر عبر الجينوم. اكتشف لينش أنه في بعض الأحيان، يمكن أن تحمل الجينات القافزة طفرات مفيدة تؤدي إلى أشياء جديدة بشكل دراماتيكي.

هناك حرب تدور داخل الجينوم، بين الجينات القافزة وبقية حمضنا النووي. هذا التوتر بين الجين الأناني والقوى التي تسعى إلى السيطرة عليه يحدث في الجينوم كل يوم.

اتضح أنَّ الحمض النووي لديه آليات خفية للتحكم في الجينات القافزة. تتضمن إحداها تسلسلًا صغيرًا من الحمض النووي يعمل مثل صياد قاتل، قادر على إسكات الجينات القافزة عن طريق الارتباط بالجزء من الجين الذي يجعله يقفز، ثم تحزيمه حرفيًّا بالبروتين حتى لا يتمكن من القفز. وبعد تحييده بهذه الطريقة، لا يقفز الجين، بل يلزم مكانه. يمكن لآلية الإسكات هذه التحكم في الجينات القافزة ومنعها من السيطرة إلى حد تعطيل عمل الجينوم، ويمكنها أيضًا العمل على تدجين الجينات القافزة. إذا كان الجين القافز يحتوي تسلسل مفيد محتمل، فإن الحمض النووي الصياد القاتل يمكنه تحييد القدرة على القفز وإبقائه في مكانه ليلعب دورًا جديدًا، أي: يمكنه إسكات الجزء القافز مع الإبقاء على الطفرة المفيدة.

وهذا ما وجده لينش في مفاتيحه: كل المفاتيح التي تصنع الخلايا السّدَويّة الساقطة كان بها تسلسل خاص بدا للعالم كله أنه جاء في

الأصل من جين قافز، لكن كان بالجين اختلاف واحد، فقد كان هناك جزء صغير من الحمض النووي مفقودًا، وليس فقط أي حمض نووي، إنه الحمض النووي الذي يتسبب في قفز الجين. كان ذلك أشبه بما لو أن الشيفرة قد اختُرقت لمنع الجين من القفز وإبقائه في مكانه لأداء عمله في صنع الخلايا السّدَويّة الساقطة. بعد قص زنبركاته، استُغل الجين الذي لم يعد قادرًا على القفز حيث هبط.

ما رآه لينش في الحمل هو نافذة على عالم أكبر بكثير. إن الجينوم في حالة حرب مع نفسه: بين الجينات القافزة والقوى التي تحاول احتوائها. ومن هذا الصراع يأتي الابتكار، حيث يمكن لطفرة واحدة أن تنتشر عبر الجينوم، وبمرور الوقت، أن تُحدث ثورة.[86]

هذه التحولات بعيدة كل البُعد عن مسوخ جولدشميت الواعدة، فليس من الضروري أن تنشأ طفرة ثورية في خطوة واحدة. بل يمكن أن ينشأ تغير تدريجي في مكان واحد من الجينوم، وإذا ارتبط بجين قافز، فإنه ينتشر ويتعاظم بمرور الوقت في الأجيال اللاحقة.

لكن الحرب داخل الجينوم تمتد إلى نطاق أوسع، ومرة أخرى، يكشف الحمل كيف يحدث ذلك.

اختراق المخترقين:

في المشيمة، على الحدود بين الجنين والأم، يؤدي أحد البروتينات

---

(86) يُعد تحويل الجينات القافزة إلى أجزاء مفيدة من الجينوم (ما يُعرف بتدجينها) مجالًا نشطًا للبحث. وهذه عينة من الأوراق والمراجع:

D. Jangam et al., "Transposable Element Domestication as an Adaptation to Evolutionary Conflicts," Trends in Genetics 33 (2017): 817–31; and E. B. Chuong et al., "Regulatory Activities of Transposable Elements: From Conflicts to Benefits," Nature Reviews Genetics 18 (2017): 71–86.

دورًا خاصًا جدًّا. يوجد السنسيتين Syncytin عند سطح التماس ذلك، ويعمل كشرطي مرور جزيئي، حيث تتبادل الأم والجنين العناصر الغذائية والفضلات. ويشير عدد من الملاحظات إلى أن هذا البروتين ضروري لصحة الجنين. وعندما أنتجت مجموعة من العلماء فأرًا به جين سنسيتين معيب، نمت الفئران وعاشت بشكلٍ طبيعي، لكنها لم تتمكن من التكاثر. بعد الإخصاب، لا تتشكل المشيمة، ولا يتمكن الجنين من الحياة؛ بسبب افتقارها إلى السنسيتين، ولم تتمكن الأم من تكوين مشيمة قادرة على العمل، ولم يستطع الجنين الحصول على العناصر الغذائية. تسبب العيوب في السنسيتين أيضًا مجموعة واسعة من مشاكل الحمل في البشر. والنساء المصابات بتسمم الحمل لديهن جين سنسيتين معيب، فيُصنع لديهن البروتين، لكنه لا يستطيع أداء عمله بشكلٍ جيد. وهذا يؤدي إلى تفاعل متسلسل في المشيمة يؤدي إلى ارتفاع ضغط الدم بشكل خطير.

بدأ أحد مختبرات الكيمياء الحيوية في فرنسا في دراسة بنية البروتين من خلال استكشاف تسلسل الحمض النووي الذي يصنعه، وكما رأينا في أبحاث لينش، بمجرد تحديد تسلسل الجين، يمكن إدخال الشيفرة على جهاز حاسوب ومقارنته بقواعد البيانات التي تحتوي جينات أخرى من الكائنات الحية. تفحصه برمجيات التعرف على الأنماط تلك، وتقارن الجين بأكمله، فضلًا عن أجزاء صغيرة منه بحثًا عن أي أوجه تشابه مع تسلسلات الجينات الأخرى المعروفة. على مدى العقود القليلة الماضية، امتلأت قواعد البيانات بملايين التسلسلات لبروتينات وجينات من كل شيء، من الميكروبات إلى

الفيلة. وقد كشفت هذه المقارنات أن العديد من الجينات هي جزء من عائلات الجينات المتكررة التي رأيناها في الفصل الخامس. في حالة السنسيتين، كان العلماء يبحثون عن أوجه تشابه مع بروتينات أخرى قد تمنحهم أدلة عن كيفية عمل السنسيتين في أثناء الحمل.(87)

تكشفت الأبحاث عن لغز، وأظهرت عملية البحث في قاعدة البيانات أن السنسيتين لا يتشابه بأي شكل مع البروتينات الموجودة في أي حيوانات أخرى، ولا يبدو مثل أي شيء في النباتات أو البكتيريا أيضًا.

كان التطابق الحاسوبي محيرًا بقدر ما كان مفاجئًا: من بين كل الأشياء في العالم كله بدا تسلسل السنسيتين كأنه وباء كان مطابقًا في بعض المواضع لوباء نقص المناعة البشرية، الوباء الذي يسبب

---

(87) هناك تقييم جيد لأبحاث السنسيتين في:

C. Lavialle et al., "Paleovirology of 'Syncytins,' Retroviral env Genes Exapted for a Role in Placentation," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B 368 (2013): 20120507; and H. S. Malik, "Retroviruses Push the Envelope for Mammalian Placentation," Proceedings of the National Academy of Sciences 109 (2012): 2184–85.

للاطلاع على اكتشافات السنسيتين:

S. Mi et al., "Syncytin Is a Captive Retroviral Envelope Protein Involved in Human Placental Morphogenesis" Nature 403 (2000): 785–89; J. Denner, "Expression and Function of Endogenous Retroviruses in the Placenta," APMIS 124 (2016): 31–43; A. Dupressoir et al., "Syncytin-A Knockout Mice Demonstrate the Critical Role in Placentation of a Fusogenic, Endogenous Retrovirus-Derived, Envelope Gene," Proceedings of the National Academy of Sciences 106 (2009): 12127–32; and A. Dupressoir et al., "A Pair of Co-Opted Retroviral Envelope Syncytin Genes Is Required for Formation of the Two-Layered Murine Placental Syncytiotrophoblast," Proceedings of the National Academy of Sciences 108 (2011): 1164–73.

الإيدز. لماذا قد يشبه وباء مثل هذا بروتينًا يوجد في الثدييات، ناهيك عن أنه البروتين الذي يُعد جزءًا أساسيًّا في الحمل؟

قبل استكشاف السنسيتين، كان على الباحثين أن يصبحوا خبراء في الأوبئة. والأوبئة هي طفيليات جزيئية مراوغة. الجينوم الموجود بها مجرد من كل شيء إلا من الآليات اللازمة للعدوى والتكاثر. إنها تغزو الخلايا، وتدخل النواة، وتدخل الجينوم نفسه. وبمجرد وصولها إلى الحمض النووي، تستولي على جينوم المضيف وتستخدمه لعمل نسخ من نفسها وإنتاج بروتينات وبائية بدلًا من بروتينات المضيف. وبهذه العدوى، تصبح خلية مضيفة واحدة مصنعًا لإنتاج ملايين الأوبئة. ولكي ينتشر الوباء مثل وباء نقص المناعة البشرية من خلية إلى أخرى، فإنه يصنع بروتينًا يجعل خلايا المضيف تلتصق ببعضها. يضم البروتين الخلايا معًا، ويصنع مسارات لانتقال الوباء من خلية إلى أخرى. ولفعل ذلك، يتموضع البروتين عند سطح التماس بين الخلايا ويتحكم في حركة المرور بينها. هل يبدو ذلك مألوفًا؟ لا بد أنه كذلك؛ لأن السنسيتين يفعل ذات الشيء في المشيمة البشرية. يضم السنسيتين الخلايا معًا في المشيمة، ويتحكم في حركة الجزيئات بين خلايا الجنين وخلايا الأم.

وكلما بحثوا أكثر، وجد الفريق أنَّ السنسيتين هو في الأساس بروتين وبائي فقد قدرته على إصابة الخلايا الأخرى. أدى هذا التشابه بين بروتين الثدييات والوباء إلى فكرة جديدة. وهي أنه في مرحلةٍ ما من الماضي البعيد، غزا أحد الأوبئة جينوم أسلافنا. كان ذلك الوباء يحتوي نسخة من السنسيتين. وبدلًا من السيطرة على

جينوم أسلافنا لصنع نسخ لا نهاية لها من نفسه، جرى تحييد الوباء، وفقد قدرته على إحداث العدوى، ثم بدأ العمل عند سيّد جديد. إن الجينوم في حرب مستمرة مع الأوبئة. وفي هذه الحالة، ومن خلال آليات لمَّا نفهمها بعد، استؤصل الجزء المعدي من الوباء، واستُخدم الوباء في صنع السنسيتين للمشيمة. جلبت الأوبئة البروتين إلى الجينوم، واختُرق جينوم الغزاة ليصبح ذا فائدة للمُضيف.(88)

ثم نظر العلماء إلى بنية السنسيتين في ثدييات مختلفة، ووجدوا أن النسخة الموجودة في الفئران تختلف عن تلك الموجودة في الرئيسيات. وبمقارنة قواعد البيانات، رأوا أن غزوات وبائية مختلفة كانت مسؤولة عن السنسيتين في الثدييات المختلفة. نشأت نسخة الرئيسيات عندما دخل وباء إلى السلف المشترك لجميع الرئيسيات الحية. نشأ السنسيتين في القوارض والثدييات الأخرى من حدثٍ مختلف، مما أدى إلى ظهور نسخهم المميزة من السنسيتين. والنتيجة النهائية هي أن الرئيسيات والقوارض والثدييات الأخرى لديها أنواع مختلفة من السنسيتين الآتية من غزاة مختلفين.(89)

إن حمضنا النووي ليس ميراثًا ورثناه بالكامل عن أسلافنا. لقد

---

(88) للاطلاع على تقييم عام لدور الفيروسات القهقرية في تطور المشيمة:
D. Haig, "Retroviruses and the Placenta," Current Biology 22 (2012): 609–13.

(89) عُثر على السنسيتين الآن في الأنواع الأخرى التي لها تراكيب تشبه المشيمة، مثل: السحالي. انظر:
G. Cornelis et al., "An Endogenous Retroviral Envelope Syncytin and Its Cognate Receptor Identified in the Viviparous Placental Mabuya Lizard," Proceedings of the National Academy of Sciences 114 (2017): E10991–E11000.

أقحم الغزاة الوبائيون أنفسهم، ثم استفدنا منهم، فقد كانت معارك أسلافنا معهم واحدة من الروافد العديدة للابتكار.[90]

ذكريات الزومبي:

عندما كان جيسون شيبرد طفلًا نشأ بين نيوزيلندا وجنوب إفريقيا، أزعج والدته بالأسئلة إلى درجة أنها أخبرته أخيرًا أنَّ عليه أن يصبح عالمًا ليعثر على الإجابات التي يريد، وعندما تخرج من المدرسة الثانوية، كان قد قرر دراسة الطب، فبدأ برنامجًا مكثفًا ليحصل على التدريب التمهيدي والطبي في حوالي سنوات قليلة. وفي السنة الأولى من البرنامج، قرأ كتاب أوليفر ساكس الكلاسيكي «الرجل الذي حسب زوجته قبعةً». ذلك الكتاب وحده غيَّر حياته. ألهمه ساكس، فترك البرنامج وبدأ مهنة جديدة في دراسة الجزيئات والخلايا التي تجعل دماغنا يعمل. وأصبح هدفه، كما وصفه، معرفة ما يجعلنا بشرًا. أصبحت الذاكرة وفقدانها فريسته العلمية. إن قدرتنا على تذكر الماضي تحدد الكثير من سمات الكيفية التي نتعلم بها، ونتواصل مع الآخرين، ونعيش في العالم. وهذا ليس موضوعًا بحثيًّا بحتًا، فإحدى التحديات الكبيرة التي نواجهها كمجتمع هو مرض التنكُّس العصبي، ففي الوقت الذي نطيل فيه معدل أعمارنا، يبدو الدماغ المصاب بالشيخوخة حاجزًا أهم من أي وقت مضى. إنَّ

---

(90) إنَّ البحث عن الأوبئة الميتة أو المستأنسة من زمن طويل هو مجال في حد ذاته، يُعرف باسم: علم الأوبئة القديمة". لمزيد من المعلومات، راجع:

M. R. Patel et al., "Paleovirology—Ghosts and Gifts of Viruses Past," Current Opinion in Virology 1 (2011): 304–9; and J. A. Frank and C. Feschotte, "Co-option of Endogenous Viral Sequences for Host Cell Function," Current Opinion in Virology 25 (2017): 81–89.

فقدان الذاكرة والوظائف المعرفية من الآفات التي تترتب عليها خسائر عاطفية واجتماعية ومالية كبيرة تفوق الحصر.

في سنة شيبرد الأخيرة في الكلية، وبينما كان يبحث عن موضوعٍ لبحثه في البيولوجيا العصبية، صادف مقالًا عن جين يُدعى آرك Arc بدا أنه يشارك في صنع الذكريات. ففي الفئران، ينشط آرك عندما تتعلم تلك المخلوقات. وفوق ذلك، فهو ينشط في الدماغ في الفراغات الموجودة بين الخلايا العصبية المختلفة. بدا أن آرك يناسب مواصفات الجين المهم للذاكرة.

بعد سنوات قليلة من بحث شيبرد في الكلية، تطورت التقنيّة إلى حد أن الباحثين تمكنوا من إنتاج فئران تفتقر إلى جين آرك. نجت الفئران، ولكن كان لديها عدد من المشاكل. فعندما عُرضت عليها مُتاهة بها قطعة جبن في المنتصف، تمكنت من حلّ المتاهة، لكنها لم تتمكن من تذكر شكلها في اليوم التالي. وهذا شيء تستطيع الفئران ذات الذاكرة الطبيعية أن تفعله في كثيرٍ من الأحيان. وفي اختبار تلو الآخر، كشفت الفئران عن عجز مُحدد في تكوين الذكريات. ومن المعروف أنَّ الطفرات في آرك عند البشر ترتبط بمجموعةٍ من الاضطرابات العصبية من الزهايمر إلى الفصام.

أصبحت الذاكرة وجين آرك محور مسيرة شيبرد المهنية. فالتحق بالدِّراسات العليا لدراسة آرك مع أحد علماء الأحياء الذين اكتشفوا دوره في السلوك لأول مرة. وبعد تخرجه، أجرى تدريب ما بعد الدكتوراه مع العالم الذي اكتشف مكان وجود جين آرك في الجينوم. كان جين آرك في دماغ شيبرد بالمعنى الحرفي والمجازي.

شيّد شيبرد مُختبره الخاص كعالم مستقل في جامعة يوتا، وابتكر تجارب لفهم كيفية عمل بروتين آرك، فمن الواضح أنه يشارك في نقل الإشارات من خلية عصبية إلى أخرى، وهذه الإشارات مهمة في الذاكرة والتعلم، وقد وجد إجابات لأسئلته عن طريق تنقية البروتين، ومن ثم تحليل بنيته.

تتضمن عملية تنقية البروتين عددًا من الخطوات لاستبعاد كل شيءٍ في الخلية عدا البروتين محل الاهتمام. تبدأ العملية بمَرْث الأنسجة كيميائيًّا - في هذه الحالة، الأدمغة - وتحويلها إلى سوائل، ثم معالجتها تباعًا لعزل البروتين المرغوب عن جميع البروتينات الأخرى. يُمرر حساء البروتين في سلسلة من الأنابيب، يسحب كل منها الملوثات المختلفة. في إحدى الخطوات النهائية، يُمرر السائل في عمودٍ زجاجي مُعبأ بمادة هلامية خاصة. يزيل الهلام الملوثات الباقية والبروتينات الأخرى، والسائل الذي يمر عبره يحتوي فقط البروتين المنقّى. أدى شيبرد كل الخطوات، وحصل على كميات صغيرة من السائل لمعالجتها في كل مرة، ثم سكب السائل في العمود الزجاجي الأخير فحصل على - لا شيء. لم يخرج شيء من العمود. غيّر الهلام بآخر. ومرة أخرى لم يحدث شيء. من الواضح أن شيئًا ما كان يعوقه. جرب الفريق أعمدة جديدة، لكن الأنابيب ظلت مسدودة. فتلاعبوا بتركيزات السوائل المختلفة. بقي الانسداد.

كان لدى فني المختبر الذي يعمل مع شيبرد حدس. ربما كان هناك شيء مميز في بروتين آرك تسبب في انسداد الأعمدة، فبدلًا من أن يكون خطأً فنيًّا، لربما كان ذلك يخبرنا شيئًا عن بنية جزيء آرك نفسه.

أخذ شيبرد ومساعده السوائل التي لم ترشح إلى المجهر الإلكتروني، حيث يمكنهم رؤية بنية البروتينات على شاشة حاسوب بتكبير فائق. كانت بنية البروتين مفاجئة للغاية إلى درجة أن شيبرد صرخ عندما رآه: «ما الذي يحدث بحق الجحيم؟»

كان آرك يتشكل على هيئة كرات مجوفة، وكانت تلك الكرات كبيرة جدًّا إلى درجة أنها علقت في الفراغات الموجودة داخل مرشّح الهلام، فقد رأى نسخًا من هذه الكرات من قبل، في تدريبه التمهيدي للطب. كان هيكل الكرات مطابقًا لتلك التي تصنعها بعض الأوبئة في أثناء انتقالها من خلية إلى أخرى لإصابتها.

يعمل شيبرد في جناح الأبحاث بالمركز الطبي في جامعة يوتا، فذهب إلى الجانب الآخر من المبنى لزيارة فريق يدرس الأوبئة المسبب لنقص المناعة البشرية. ينتقل وباء الإيدز من خليةٍ إلى أخرى عن طريق تكوين كبسولة بروتينية تنقل معلوماته الوراثية. عرض شيبرد الصور المجهرية على فريق علم الأوبئة، وترك أولئك العلماء يحاولون معرفة ما تلك الكرات الغريبة. اعتقد الباحثون في مجال وباء الإيدز أنها جاءت من وباء يشبه الإيدز، ولم يتمكنوا من العثور على أي فرق بين كبسولة آرك وتلك التي يصنعها وباء الإيدز، فكلاهما مكوّن من أربع سلاسل مختلفة من البروتينات، وكلاهما له نفس البنية الجزيئية، وصولًا حتى إلى البنية الذرية للانحناءات والطيات. ومثلما يدرس علماء التَّشريح العظام ويعطونها أسماء، فإنَّ علماء الكيمياء الحيوية لديهم أسماؤهم للبنى الكيميائية أيضًا. هناك انحناء في التركيب الجزيئي يُعرف باسم: «**مفصل الزنك**» وهو أحد سمات

وباء الإيدز، وقد كان موجودًا في آرك أيضًا.

أصبح من الواضح أنَّ بروتين آرك كان مطابقًا تقريبًا لأوبئة مثل وباء الإيدز، ويعمل كل من الجزيئين بنفس الطريقة تمامًا – فهما ينقلان أجزاء صغيرة من المادة الوراثية من خلية إلى أخرى. وكما رأينا، فإن السنسيتين يشبه أيضًا وباء نقص المناعة البشرية، وإن كان بطرق مختلفة.

من خلال العمل مع علماء الوراثة، رسم فريق شيبرد خريطة لبنية الحمض النووي لآرك، وبحثوا في قواعد بيانات الجينوم للمملكة الحيوانية بحثًا عن كائنات أخرى تملكه. ومن خلال تتبع بنية الجين وتوزيعه، ظهرت قصة حالات العدوى القديمة. جميع الحيوانات التي تعيش على اليابسة لديها جين آرك، أمّا الأسماك، فلا. وهذا يعني أنه منذ حوالي 375 مليون سنة، دخل وباء إلى جينوم الجد المشترك لجميع الحيوانات التي تعيش على اليابسة. وأنا أُحب أن أعتقد أنَّ أحد أقرباء تيكتاليك هو الذي أصيب بالعدوى الأولى، وبمجرد انضمام الوباء إلى المضيف، حمل معه القدرة على صنع بروتين خاص، وهو نسخة من آرك. عادة يُستخدم ذلك البروتين للسماح للوباء بالانتقال من خليةٍ إلى أخرى والانتشار. ولكن في هذه الحالة، وبسبب مكان دخوله في جينوم السَّمكة، أصبح البروتين نشطًا في الدماغ وفي تعزيز الذكريات. تلقى الأفراد الذين أصيبوا بالوباء هدية بيولوجية. اختُرق الوباء، وجرى تحييده، وتدجينه ليؤدي وظيفة جديدة في الأدمغة. إنَّ قدرتنا على القراءة والكتابة، وتذكر لحظات حياتنا تعود إلى عدوى وبائية قديمة حدثت عندما خطَت

الأسماك خطواتها الأولى على اليابسة.

متحمسًا لعرض نتائجه، ذهب شيبرد إلى مؤتمر لعلم الأعصاب والسلوك. وقبل أن يتحدث، سمع عالمة تعمل على ذباب الفاكهة تلقي محاضرتها. وبيّنت أن الذباب لديه بروتين آرك. ينشط آرك الذباب، كما فينا، في الفراغات بين الخلايا العصبية. وفوق ذلك، يشكل آرك الذباب كبسولات مجوفة تنقل الجزيئات من خلية عصبية إلى أخرى. لكن آرك الذباب يبدو شبيهًا بوباء مُختلف عن ذلك الموجود في الحيوانات التي تعيش على الأرض، فقد جاء ذلك البروتين من لقاء منفصل مع الأوبئة.[91]

كيف يدجّن الجينوم الوباء ويستغله بدلًا من السماح له بمواصلة العدوى؟ الجواب غير واضح، ولكن هناك العديد من الطرق المختلفة التي يمكن أن يحدث بها ذلك. تأمّل مصير كل من الوباء والمضيف في ظل ظروف مختلفة. إذا كان الوباء شديد العدوى، فسوف يموت المضيف، ولن ينتقل الوباء من جيل إلى جيل. أمّا إذا كان الوباء حميدًا أو مفيدًا نسبيًّا، فسوف يدخل الجينوم ويقيم هناك. وإذا وصل الوباء إلى جينوم الحيوان المنوي أو البويضة، فسوف ينقل

(91) دراسات جيسون شيبرد على آرك موجودة في:

E. D. Pastuzyn et al., "The Neuronal Gene Arc Encodes a Repurposed Retrotransposon Gag Protein That Mediates Intercellular RNA Transfer," Cell 172 (2018): 275–88.

استعرض إيد يونج الورقة لجمهور أكبر في "خلايا المخ تشارك المعلومات عن طريق كبسولات تشبه الأوبئة":

"Brain Cells Share Information with Virus-Like Capsules," Atlantic (January 2018).

الوباء جيناته إلى النسل. وبمرور الوقت، وإذا كان الأوبئة تأثير مفيد للغاية، على سبيل المثال: من خلال تكوين مخلوقات ذات مشيمة أكفأ أو ذاكرة أفضل، فإنَّ الانتخاب الطبيعي يمكن أن يصقله للبقاء في مكانه والقيام بعمله بكفاءة أكبر من أي وقتٍ مضى.

يشبه الجينوم ما تجده عادة في أفلام الدرجة الثانية، مثل: مقبرة مليئة بالأشباح. تُوجد أجزاء وقطع من كسرات وبائية قديمة في كلِّ مكان. وبحسب بعض التقديرات، يتألف 8٪ من الجينوم فينا من أوبئة ميتة، أكثر من مائة ألف منها حسب آخر إحصاء. وتملك بعض هذه الأوبئة المتحجرة وظيفة، فهي تصنع البروتينات المفيدة في الحمل والذاكرة وأنشطة أخرى لا حصر لها اكتُشفت في السنوات الخمس الماضية. والبعض الآخر يقبع كالجثث، حيث ينطفئ ويتحلل بعد الاتصال بالجينوم.

هناك صراع يدور داخل الجينوم. بعض أجزاء المادة الوراثية توجد بهدف عمل نسخ أكثر من نفسها. ربما تكون غزاة أجانب، مثل الأوبئة التي تدخل الجينوم للسيطرة عليه، ويمكن أيضًا أن تكون أجزاء أصيلة من الجينوم، مثل: الجينات القافزة التي تتكاثر وتنغمس في كل مكان. في بعض الأحيان، عندما تهبط هذه العناصر الجينية الأنانية في مكان محدد، يمكن استخدامها لصنع أنسجة جديدة، مثل: بطانة الرحم، أو للسماح بوظائف جديدة، مثل: الذاكرة والإدراك. يمكنُ أن تنتشر الطفرات الجينية على نطاق واسع عبر الجينوم في عددٍ صغير من الأجيال. وإذا احتلت الأوبئة أنواعًا مختلفة، فيمكن أن تنشأ تغيرات جينية متماثلة في أنواع مختلفة من

المخلوقات بشكلٍ مستقل.

استمر تناولي الشاي مع ماير يوم الخميس مدة عامين آخرين بعد هفوة جولدشميت. وخلال تلك الاجتماعات اللاحقة، اكتشفت أن ماير يحترم على مضض محاولة جولدشميت توحيد التجارب في علم الجينات وعلم الأحياء التطوري مع الأحداث الكبرى في السجل الحفريّ. وبحلول منتصف الثمانينيات، كان يعلم أنَّ هناك ثورة قادمة في مجال البيولوجيا الجزيئية، ولذلك شجع طلاب الدِّراسات العليا في دائرته على الاطلاع على الجديد في هذا المجال من البحث.

ولعل ليليان هيلمان كانت ستقول في هذا السياق: لا شيء يبدأ أبدًا متى أو **حيث** تعتقد أنه بدأ. فالجينوم ليست خيوطًا ثابتة، بل يلتف ويدور باستمرار وتهاجمه الأوبئة، وتقفز فيه الجينات. تستطيع الطفرات الجينية أن تنتشر في الجينوم وبين الأنواع المختلفة. ويمكن أن تكون التغييرات في الجينوم سريعة، ويمكن أن تحدث تغييرات جينية متماثلة بشكلٍ مستقل في كائنات مختلفة، ويمكن أن يختلط جينوم الأنواع المختلفة ويندمج لصياغة ابتكارات بيولوجية.

الفصل السابع

التَّطور المُنحاز

في أثناء السنة الأخيرة من دراستي العليا كنت أسدد الفواتير عن طريق العمل في مناوبة منتصف الليل كحارس أمن في قسم الكيمياء، فضلًا عن العمل كمدرس مساعد خلال النهار؛ ونظرًا لأنَّ مباني الكيمياء في الساعة الثالثة صباحًا لم يكن بها إلا عدد قليل فقط من محبي العمل ليلًا، كنت أقوم بجولاتي، ثم أستمتع بليالي هادئة أغوص فيها في المؤلفات الكلاسيكية في علم الحفريّات. وفي نهاية مناوبتي، كنت أُجري أبحاثي الخاصة، ثم أساعد في تدريس علم الحفريّات في فصل دراسي كبير. لقد منحني ذلك الوقت الفرصة للاطلاع على أفكار ومناقشات عظيمة. ولم يضرني أنَّني كنتُ في مهمتي الرئيسة في التدريس، واحدًا من مجموعة المساعدين للراحل ستيفن جاي جولد في محاضراته الشهيرة عن تاريخ الحياة.

في منتصف الثمانينيات، برز جولد كشخصية عامة كبيرة، إذ اعتمد على خلفيته بِعَدِّه عالم حفريّات للغوص في المسائل الخلافية، وكانت له مواقف راديكالية حول طرق ظهور الأنواع الجديدة وكيفية حدوث التغيير التطوري. كانت دروسه في الجامعة تضم حوالي ستمائة طالب الذين عدّوها من متطلبات توزيع المواد

الدراسية الإلزامية، وكان من غير المرجح أن يصبحوا متخصصين في العلوم. أثبت هؤلاء المستمعون أنهم مجموعة مركزة مثالية بالنسبة لجولد لتجربة نظرياته وعروضه الجديدة عليهم. كل يوم ثلاثاء وخميس في الخريف كان يُسهب في الحديث، ويلقي محاضرات بأسلوب درامي متأنق للطلاب الجامعيين الذين إمّا كانوا يجلسون مستغرقين في حديثه في الصفوف الأمامية وإما ينامون متمددين في الصفوف الخلفية.

في ذلك الوقت، كان جولد يفكر في الكوارث التي حدثت في تاريخ الحياة. حدث خمس مرات خلال الـ 500 مليون سنة الماضية، أن اختفت فجأة الأنواع التي كانت سائدة فترة طويلة من أنحاء العالم. وأشهر تلك الانقراضات هو الذي تسبب في انقراض الديناصورات. منذ حوالي 65 مليون سنة انقرضت: الديناصورات، والزواحف البحرية، والتيروصورات، وأنواع كثيرة من اللافقاريات التي كانت تعيش في المحيطات. وانخفض التنوع النباتي في جميع أنحاء العالم أيضًا. كشفت الأدلة الموجودة في الصخور عن السبب المحتمل، وهو أن كويكبًا كبيرًا ضرب الأرض، وغيّر المناخ العالمي بشكلٍ كبير، وأدى إلى انهيار النظم البيئية في أنحاء العالم، فانقرضت العديد من الحيوانات بسرعة. مهدت إزالة الديناصورات والمخلوقات الأخرى الطريق أمام الثدييات للتوسع في عالم خلت منه الضواري الضخمة والمنافسين.

في إحدى المحاضرات، طرح جولد أسئلة الواقع المختلف من نوع «ماذا لو». ماذا لو لم يصطدم كويكب بالأرض ونجت

الديناصورات والمخلوقات الأخرى؟ ماذا لو لم تقع العديد من أحداث التاريخ التي تبدو عشوائية، كيف كان سيبدو العالم؟ كانت المحاضرة قبل عطلة الشتاء، وبعد أن شاهد فيلم فرانك كابرا **إنها حياة رائعة** It's a Wonderful Life الذي يشاهده مرة في السنة، استعار جولد تشبيهًا من الفيلم. في الفيلم، يستعد البطل جورج بيلي للقفز من فوق جسر لينهي حياته، وعندها يتدخل ملاك، يمنحه فرصة للسفر عبر الزمن ليرى كيف سيؤثر انتحاره في بلدته. بدون بيلي، تتغير بيدفورد فولز، نيويورك، نحو الأسوأ. استبدل جولد اصطدام الكويكب بجورج بيلي، والحياة على الأرض بسكان بيدفورد فولز. لو لم يضرب الكويكب الأرض قبل 65 مليون سنة، الأرجح أنَّ الديناصورات كانت ستستمر، وربما لن تزدهر الثدييات أبدًا.

في الواقع، ربما لم نكن لنحيا هنا لولا ذلك الاصطدام العشوائي لإحدى الصخور بكوكبنا.

وهذا الاصطدام هو مجرد واحد من سلسلة لا حصر لها من الأحداث التي تبدو عرَضية، والتي حدثت على مدى الأربعة مليارات سنة الماضية لكي نكون هنا اليوم. وكما تشكلت حيواتنا الشخصية من خلال العديد من اللقاءات والمحادثات والفرص العشوائية، كذلك تشكَّل تاريخ الحياة من خلال التغيرات التي طرأت على: الكون، والكوكب، والجينوم. أصبحت محاضرة جولد

فيما بعد مادة لكتابه الأكثر مبيعًا بعنوان: «**الحياة الرائعة**».[92] في ذلك الكتاب، طبّق جولد تفكير «ماذا لو» على اللحظات العظيمة في تاريخ الحياة.

إنَّ العالم الطبيعي الذي نراه من حولنا اليوم، بما في ذلك وجودنا، هو نتاج دهور من الأحداث العرَضية. أعِدْ تشغيل شريط الحياة، وغيّر أي واحد منها ولو بطريقة بسيطة، وسيكون العالم - بما في ذلك وجودنا فيه - مختلفًا تمامًا.

لكن يشير العلم الحديث، إلى جانب ما يقارب قرنًا من البحث، إلى نتيجة مختلفة تمامًا. أعِدْ تشغيل شريط الحياة بأحداث عرضية مختلفة، وربما في النهاية لن تكون بعض النتائج مختلفة إلى ذلك الحد.[93]

المتكسون:

كان السيد راي لانكستر (1847-1929) رجلًا عملاقًا في الطول والعرض. وكان ثرثارًا، معتدًا برأيه، مولعًا بالجدال. كان أبوه

---

(92) الكتاب الذي انبثق عن محاضرات جولد هو، الحياة الرائعة: طين بورجيس وطبيعة التاريخ:

Stephen Jay Gould, Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History (New York: Norton, 1989).

(93) لمناقشة التطور المتقارب والمتوازي، راجع:

Simon Conway Morris, Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003).

يتخذ كونواي موريس الموقف الصارم القائل بأن التطور برمته أمر لا مفر منه. على النقيض منه، فإن كتاب جوناثان لوسوس، مصائر غير محتملة: القدر والمصادفة ومستقبل التطور، هو رؤية متوازنة بدقة للعلاقة بين المصادفة والحتمية.

Improbable Destinies: Fate, Chance and the Future of Evolution (New York: Riverhead, 2017)

طبيبًا شجعه على استكشاف العالم الطبيعي، وأعده منذ طفولته ليصبح عالمًا، حتى تلقى التدريب في أكسفورد في ستينيات القرن التاسع عشر على بعض الشخصيات البارزة في ذلك الوقت.

وبعد أن نشر داروين كتابه «أصل الأنواع»، دافع توماس هكسلي عن داروين بحماس شديد حتى أصبح يُعرف بـ: «كلب داروين». وليس من المستغرب أن وصل لانكستر إلى هكسلي. كان لانكستر شرسًا إلى حد أن مؤرخي العلوم الجدد أطلقوا عليه لقب: «كلب هكسلي». كان ميالًا إلى الجدال، بغضب في كثير من الأحيان، إلى حد أن هكسلي نفسه كان يحتاج إلى تهدئته في بعض المرّات.



السيد راي لانكستر

كان لانكستر يكشف زيف ادّعاءات الخوارق التي كانت منتشرة في العصر الفيكتوري الذي عاش فيه، فاشتهر بكشف الوسيط الروحاني الأمريكي هنري سليد خلال جلسة لتحضير الأرواح في

لندن. كان معروفًا عن سليد أنه يضع لوحًا وطباشير تحت طاولة في أثناء جلسة تحضير الأرواح للكشف عن رسائل من عالم الروح. باستخدام حجمه كسلاح في إحدى جلسات تحضير الأرواح، أمسك لانكستر اللوح قبل العرض ليكشف عن رسائل مكتوبة مسبقًا عليه. كان لانكستر متعصبًا إلى درجة أنه رفع قضية جنائية ضد سليد.

ذلك الالتزام الهائج بالشكوكية الذي كشف الخدع هو ذاته الذي كان دافعًا وراء علم لانكستر. بعد أكسفورد، تدرب كعالم تشريح في محطة علم الحيوان Stazione Zoologica في نابولي، وأصبح خبيرًا في: المحار، والقواقع، والجمبري البحري. بين يديه، كان تشريح تلك المخلوقات يأتي بالمفاجآت، وكان يجد الراحة في تقفي أثر الأدلة حيثما أخذه ذلك.

بعد داروين، بحث علماء التَّشريح عن أوجه التشابه بين الأنواع التي يمكن أن تمثل أدلة على أصلها. لعلك تذكر أن منطق داروين كان أن التشابه التَّشريحي بين الأنواع هو دليل على أنها تتشارك سلفًا واحد. تعرف هكسلي على مجموعات محددة من الأسماك التي كانت قريبة من الحيوانات ذات الأطراف؛ لأن زعانفها كانت تحتوي نسخًا من عظام الذراع بداخلها. وبالمثل، استخدم هو وآخرون أوجه التشابه التَّشريحية لإظهار أن الطيور والثدييات لها علاقات مع الزواحف المختلفة. قدم هذا المنطق تنبؤات محددة: الأنواع التي تربطها صلات قرابة وثيقة لا بد أن تكون متشابهة أكثر من تلك التي تربطها صلات بعيدة.

لكن لانكستر رأى شيئًا آخر، فقد ركز على ملاحظة لم يرها علماء آخرون، أو أنهم تجاهلوها. ففي أبحاثه على الحيوانات البحرية، وجد أن العديد من الأنواع لم تتطور عن طريق اكتساب سمات جديدة، ولكن عن طريق فقدانها.

إن التخلص من التراكيب والاتجاه نحو البساطة، أو «التَنكُّس»، كما أسماه لانكستر، فتح طرقًا جديدة للحياة. ولاحظ أنه عندما تتبنّى الكائنات أسلوب حياة طفيلي، فإنها تصبح أبسط وتفقد أجزاء من الجسم، وكثيرًا ما تفقد أعضاء كاملة. الجمبري مخلوقات لها: ذيول، وقشور، وعيون، وأحبال عصبية، أمّا الجمبري الطفيلي الذي يعيش في أحشاء مخلوقات أخرى لا تكاد توجد به أيّ من تلك الصفات، فقد تخلص من القشرة والعينين وحتى العديد من أعضائه الهضمية.

أدت دراسة لانكستر للتَنكُّس إلى ملاحظة أعمق وأكثر أهمية.

الجمبري الطفيلي، بصرف النظر عن المكان الذي يعيش فيه على هذا الكوكب، أو عن الجزء من مضيفه الذي يتخصص في إصابته، سواء أكان في أحشاء الأسماك أم خياشيمها، يفقد دائمًا نفس أجزاء الجسم. وينطبق الشيء ذاته على العديد من المتنكسين الآخرين. تفقد الحيوانات التي تعيش في الكهوف، سواء أكانت أسماكًا أم برمائيات أم جمبري، أعضاء لتصبح أكفأ في العيش في الكهوف المظلمة، بافتراض أن ذلك يوفر الطاقة التي تُنفق في بناء وصيانة أعضاء عديمة الفائدة. والمدهش أنَّ الأنواع المختلفة تتطور بنفس الطريقة بشكلٍ مستقل: فتصبح عديمة اللون، وتفقد أعينها، وغالبًا ما يقل حجم زوائدها.

ولعل من أوضح حالات التَنكُّس هي الثعابين التي تفقد أطرافها، باستثناء عُقدة صغيرة تظهر في بعض الأنواع. لا ينطوي تكوين جسم الثعبان على الخسارة فقط، بل تصبح الأجسام أطول بإضافة الفقرات والأضلاع. وهو جزء من نمط حياة الثعبان المتمثل في الحركة عن طريق الانزلاق. ستكون الأطراف ببساطة عائقًا في هذا النوع من الحركة.

والأجسام الشبيهة بالثعابين، كما كان لانكستر يعرف، ليست حكرًا على الثعابين. يملك عدد من أنواع السحالي المختلفة أطرافًا مختزلة للغاية وأجسامًا طويلة. إحدى مجموعات الزواحف ذات الصلة البعيدة، وهي السحالي الدودية amphisbaenians، لها أجسام طويلة وليست لها أطراف. وقد تكون معذورًا إن أخطأت وحسبتها ثعابين أو سحالي، لكن تشريح رأسها مختلف تمامًا. حتى البرمائيات تظهر في المشهد. فالبرمائيات المعروفة بالضفادع الثعبانية caecilians لها أجسام طويلة وليست لها أطراف. وهنا نفس السمة، ونفس طريقة التطور، تظهر في حيوانات مختلفة مرات عدة.[94]

الابتكارات المستقلة هي أيضًا نمط شائع في عالم الابتكار البشري. سواء أكان ابتكار الهاتف، أم اليويو، أم نظرية التطور، فإنَّ الأفكار والتقنيات تحب عادة أن تظهر مع مخترعين مختلفين في نفس

---

(94) للاطلاع على أعمال راي لانكستر حول التنكُّس والمتكررات في التطور، انظر:
E. R. Lankester, Degeneration: A Chapter in Darwinism (London: Macmillan, 1880); and E. R. Lankester, "On the Use of the Term 'Homology' in Modern Zoology, and the Distinction Between Homogenetic and Homoplastic Agreements," Annals and Magazine of Natural History 6 (1870): 34–43.

الوقت تقريبًا، وربما تظهر فكرة ما في الأفق؛ لأن التوقيت مناسب، أو لأنها تحسين واضح على تقنية موجودة، أو لأنها ناجمة عن نوع من الاتساق العميق في الطريقة التي يحدث بها الابتكار. ومهما يكن السبب، فإن الابتكارات «المتكررة» منتشرة على نطاق واسع إلى درجة أنها أصبحت القاعدة في بعض مجالات النشاط البشري، وينطبق الشيء ذاته على أجزاء من عالم الأحياء.

يمكن للمتكررات البيولوجية أن تكشف عن الآليات الداخلية للطبيعة. وسنرى كيف ذلك، علينا أن نعود إلى حيوانات أوجست دومريل الصغيرة المتواضعة.

مكتبة
t.me/soramnqraa

العالم من منظور السَّمندل:

يصعب أن يخلط المرء بين ديفيد ويك، من جامعة كاليفورنيا في بيركلي، بأسلوبه الهادئ والمتعاون، وبين راي لانكستر. ومع ذلك، كان تأثير عمل ويك منذ الستينيات على نفس القدر من الأهمية. وفي حين أن اختصاص لانكستر كان الحيوانات البحرية، فقد كرّس ويك حياته العلمية لفهم السَّمندل.

لا بد أننا محظوظون جدًّا بوجود شيء من بيولوجيا السَّمندل بداخلنا. إذا قطعتَ أحد أطرافه، يمكنه تجديده بالكامل، بما في ذلك جميع: العضلات، والعظام، والأعصاب، والأوعية الدموية. يجدد السَّمندل قلبه التالف، وحتى نخاعه الشوكي. ولديه ابتكارات رائعة، تتراوح من أنواع مختلفة من الغدد السامة إلى الطرق التي يلتقط بها الطعام. وعلى مدى أكثر من أربعة عقود، سافر الطلاب

وكبار العلماء إلى بيركلي من أنحاء العالم، من عشرات البلدان المختلفة، لتعلم بيولوجيا السَّمندل. ويك هو دومريل العصر الحديث، يبحث عن أفكار بيولوجية مدهشة في السَّمندل بسيط المظهر.



ديفيد ويك يبحث عن السَمندل في المكسيك

وكما عرفنا مع دومريل، يولد السَّمندل عادة في إحدى البيئات، ثم، مع نموه، يتحول إلى بيئة جديدة. تفقس العديد من الأنواع في الماء، ثم تنمسخ لتعيش على اليابسة.

يتضمن الانتقال إلى الأرض تغييرات شاملة في كيفية عيش الحيوانات، وخاصة كيفية حصولها على الغذاء.

بشكل عام، هناك نوعان من الحيوانات المفترسة.

تأخذ معظمها أفواهها إلى الفريسة: الأسود، والفهود، والتماسيح تنهش أو تعض في أثناء مطاردة الفريسة، أو تنتظر مرورها في صمت. تحصل الحيوانات المفترسة الأخرى على طعامها بالطريقة

المعاكسة، فتُحضر الفريسة إلى أفواهها. ينتمي السَّمندل البالغ إلى هذه الفئة.

في أثناء وجوده في الماء، يُدخل السَّمندل الحشرات والمفصليات الصغيرة إلى فمه عن طريق شفطها.

تعمل العظام الصغيرة الموجودة في آخر الحلق، وكذلك العظام الأخرى الموجودة في الجزء العلوي من الجمجمة، على توسيع تجويف الفم، وإنشاء فراغ يسحب الماء والفريسة إلى الداخل، وبينما تعمل هذه الاستراتيجية بشكل جيد مع البرمائيات في الماء، فإنها غير مجدية على الأرض.

ستحتاج الحيوانات البرية إلى آلة فراغية بقوة محرك نفاث أكبر من أجسامها بالكامل لخلق ما يكفي من قوة الشفط لسحب الفريسة الثقيلة عبر الهواء إلى أفواهها.

يستخدم السَّمندل العديد من احيل لإدخال الفرائس إلى فمه على اليابسة.

تُخرج بعض الأنواع لسانها خارج أجسامها، وتلتقط الحشرات، وتسحبها إلى الداخل. وهي تدفع لسانها في الهواء إلى مسافة تصل إلى نصف طول جسمها تقريبًا، وتطلق صفيحة لزجة لالتقاط الحشرات الصغيرة ونقلها إلى الفم.

هناك نوعان من الميزات يسمحان للسمندل بإنجاز هذا العمل الفذ: الآليات التي تدفع اللسان وتلك التي تسحبه.

يعد هذا اللسان المتخصص أحد أبرز ابتكارات الطبيعة، وبالرغم من أنه قد يبدو متخصصًا للغاية، فإنه يحمل مفاجآت عامة لفهم

الحياة على الأرض. وبما أن جمال هذا النظام وأهميته ينبعان من التفاصيل التَّشريحية، فإننا بحاجة إلى التعمق في بعض أوجه تشريح السَّمندل.

لنبدأ في تخيّل حركة لسان السَّمندل، حاول إخراج لسانك. التفاعل المعقد بين العضلات يجعل تلك الحركة ممكنة. لساننا هو في الأساس مجموعة من العضلات التي يجمعها نسيج ضام وتغطيها براعم التذوق. وهناك سلسلة من العضلات الأخرى تربط اللسان بعظام الفك والحلق.

يؤدي إخراج لسانك إلى تحريك العضلات الداخلية في اللسان - تلك التي تغير شكله من الرخو إلى الصلب، ومن المسطح إلى الممدود - فضلًا عن العضلات الخارجية المرتبطة باللسان، لتسحبه خارج الفم. إحدى العضلات الرئيسة التي تسحب اللسان إلى خارج الفم تتصل بقاعدة الذقن، وتتصل بقاعدة اللسان. عندما تنقبض هذه العضلة، العضلة الذقنية اللسانية، يخرج لسانك.

يستخدم البشر العضلة الذقنية اللسانية في الكلام وتناول الطعام. في الواقع، يُستخدم تعديل العضلة الذقنية اللسانية أحيانًا كعلاج جراحي للشخير.

إذ يؤدي شد تلك العضلة إلى تحريك وضع استقرار اللسان للأمام، بعيدًا عن الحلق. وهذا التعديل يمنع اللسان من سدّ مجرى الهواء في أثناء النوم، وبالتالي، يمنع الشخير، على أمل، منع انقطاع التنفس في أثناء النوم.

وفي حين أننا نحن البشر نفخر بقدرتنا على الكلام، وهي تستحق

الفخر التي تعد حركات اللسان والعضلة الذقنية اللسانية من الأجزاء الضرورية فيها، فإننا عاجزون إن حاولنا التقاط الحشرات الطائرة. ألسنة مثل ألسنتنا لا تبرز بعيدًا بما يكفي ولا بالسرعة الكافية لالتقاط أي شيء. وربما هذا شيء جيد، بالنظر لأعرافنا الاجتماعية وخياراتنا الغذائية، لكن هذا الوضع لا يصلح مع السَّمندل.

تملك العديد من السمادل أيضًا عضلة لسانية ذقنية، وهي تلعب دورًا في التغذية. يعدّل عدد من الأنواع العضلة الذقنية اللسانية إلى شريط طويل، عند انقباضها، يتمكّن اللسان من البروز خارج الفم. وهذا النوع من قذف اللسان هو الأكثر شيوعًا بين أنواع السَّمندل. ومع ذلك، في أولمبياد قذف اللسان، لن يصل به ذلك حتى إلى التصفيات الأولية: إنه شيء رائع، ولكنه ليس بروعة الآليات الأخرى المذهلة. إن السرعة التي يمكن أن تنقبض بها العضلة الذقنية اللسانية تضع حدًّا ماديًّا على سرعة عمل هذا النظام. صحيح أنها سريعة، ولكنها ليست بالسرعة الكافية لالتقاط العديد من الحشرات سريعة الطيران.

يملك جنس السَّمندل بوليتوجلوسا Bolitoglossa، وهو من الأجناس التي تخصص فيها ويك، يملك القدرة على إبراز لسانه بمقدار نصف طول جسمه، ثم سحبه في أقل من جزءٍ من ألفين من الثانية. إن مشاهدتها وهي تتغذى تجربة محيرة. يتحرك اللسان بسرعة كبيرة لدرجة أنه بالكاد يمكن إدراك الحركة، حتى في مقاطع الفيديو البطيئة على يوتيوب. الشيء الذي يُعجز العقل هو أن السَّمندل لا

يملك عضلات تستطيع أن تنقبض بالسرعة التي ينطلق بها لسانه، إنه يطلق لسانه بسرعة تفوق حدود سرعة العضلات نفسها. يبدو أن تلك السهادل تخترق قوانين الفيزياء.[95]

ركز ديفيد ويك وأحد طلابه في الدِّراسات العليا في الستينيات، وهو إريك لومبارد، على هذه الألسنة في جهد دام قرابة عشر سنوات لفهم كيفية عملها، والأهم، كيف نشأت. فشرّحوا ألسنة أنواع مختلفة، ونظروا بعناية في كل: عضلة، وعظم، ورباط. وقد تلاعبوا بعظام وعضلات مختلفة باستخدام الملقط؛ لمعرفة ما إذا كانت بإمكانهم محاكاة الحركات. وبعد عقود، صوّر أحد طلاب ويك حركات عالية السرعة للألسنة ليرى كيف تعمل العضلات والعظام معًا لتفعل ما بدا أنه مستحيل.

اكتشف ويك أنَّ ألسنة السَّمندل تعمل كمدفع بيولوجي مُعقد للغاية.

السَّمندل المتخصص للغاية لا يُخرج لسانه فحسب، بل ينطلق لسانه من الفم مثل رصاصة مربوطة بخيط. وإذا لم يكن ذلك غريبًا بما يكفي، فإنَّ القذيفة التي يطلقها السَّمندل هي العظام الصغيرة لجهازه الخيشومي والمتصلة بصفيحة لزجة. إنها تدفع حرفيًّا أجزاء من خياشيمها إلى مسافة تصل إلى نصف طول الجسم في غمضة عين. ومن ثم، وبنفس الطريقة المذهلة، يعود اللسان إلى الفم بنفس السرعة التي خرج بها.

---

(95) توجد لقطات جيدة لإطلاق لسان السمندل على:
https://www.youtube.com/watch?v=mRrlITcUeBM.

في السَّمندل ذي اللسان المقذوف تختفي العضلة اللسانية الذقنية تمامًا. تنقبض هذه العضلة ببطء شديد وستعيق الطريق عندما تنطلق القذيفة. أيضًا، في معظم أنواع السَّمندل، تكون عظام الخياشيم مثبتة على جانبي الرأس لتعمل بمثابة قاعدة لشُعيرات الخياشيم. أمّا السَّمندل ذو اللسان المقذوف، فيتصرف بشكلٍ مختلف. تتحرر عظام الخياشيم من الجمجمة، وتلتصق باللسان لتشكل المقذوف الذي ينطلق كالرصاصة.[96]

لاستحضار صورة لانطلاق لسان السَّمندل، تخيل انطلاق بذرة البطيخ عندما تضغط عليها بين الإبهام والسبابة. البذرة زلقة ومدببة. عندما تضغط عليها بأطراف أصابعك، تنطلق البذرة بسرعةٍ وبعيدًا. وينطبق الشَّيء نفسه على ألسنة السَّمندل. تعمل العضلات المحكمة كعصّارات، وتصبح القضبان العظمية للجهاز الخيشومي السطح الزلق والمدبب. عندما تنقبض العضلات، تنطلق العظام، تمامًا مثل بذرة البطيخ.

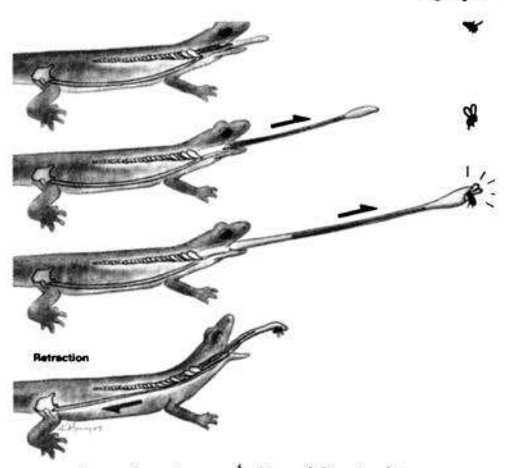
في الألسنة المقذوفة، تستطيل عظمتان من الخياشيم لتبدو كأنَّها شوكة رنانة تتجه أسنانها جهة ذيل السَّمندل. هذه القضبان الطويلة مُدببة وزلقة، مثل: بذور البطيخ. تلتف حول هذه القضبان عضلات عاصرة تمتد على طولها. عندما تنقبض هذه العضلات، فإنَّها تضغط على القضبان وتطلقها خارج الفم. والنتيجة النهائية هي

---

(96) يوجد تفصيل علمي للتشريح الكامن وراء هذه الميزة المذهلة في:
S. M. Deban et al., "Extremely High-Power Tongue Projection in Plethodontid Salamanders," Journal of Experimental Biology 210 (2007): 655–67.

أنَّ صفيحة اللسان وعظام الخياشيم تنطلق نحو هدفها. إذا نجحت العملية، تُلتقط الحشرة على الصفيحة وتعود إلى الفم.

لن ينفع السَّمندل أن يُطلق لسانه ويمسك بحشرة، ثم لا يتمكن من إعادة الفريسة أو اللسان إلى فمه. وفي حين أن فكرة عدم قدرة السَّمندل على إعادة هذا اللسان السليط قد تكون فكرة كوميدية، فإنَّ ذلك الوضع سيكون مميتًا. عند تعرضه للحيوانات المفترسة وعدم قدرته على الحصول على المزيد من الطعام، فمن المؤكد تقريبًا أنَّ الحيوان سيموت. والحل ذكي. في جميع السمادل، يلتف البطن بالعضلات التي تمتد من الورك وصولًا إلى الخياشيم. تعمل هذه العضلات عادة لدعم الجسم. في الأنواع الأكثر قدرة على قذف الألسنة، تندمج ألياف مجموعتي العضلات لتكوين عضلة واحدة تمتد من الحوض إلى عظام الخياشيم المتخصصة. تخيل زنبركًا عملاقًا عندما تُطلق عظام الخياشيم، يتمطط ذلك الحزام العضلي، ثم يرتد عائدًا بذلك الجهاز.



بروزلسان السَّمندل أعجوبة بيولوجية

لم يتضمن نشوء هذا العضو البيولوجي المُعقد استحداث أعضاء جديدة، أو حتى عظام، بل إعادة استخدام العظام والعضلات القديمة بطرق جديدة. والعضلات التي تدفع اللسان هي ذاتها التي تستخدمها السمادل الأخرى في البلع. كما أصبحت العظام التي كانت تدعم الخياشيم في السابق مُدببة من أحد طرفيها لتصبح كالرصاصات. وفُقدت العضلة الذقنية اللسانية للسماح للقذيفة بالتحليق بعيدًا. واندمجت عضلات البطن لتكوين الزنبرك الذي يسحب اللسان. لقد صنعت إعادة التوظيف هذه أعجوبة طبيعية، وهو ابتكار معقد للغاية يتضمن أجزاء كثيرة.[97]

وفي حين أنَّ لسان السَّمندل يُعد أعجوبة في حد ذاته، فقد ظهر شيء أكثر استثنائية من مجالٍ آخر من أبحاث ويك.

كان أحد تخصصات ويك هو استخدام الحمض النووي لفك رموز شجرة عائلة السَّمندل، واستكشاف كيفية ارتباط الأنواع المختلفة ببعضها. وباتِّباع التقاليد التي بدأها زوكركاندل وبولينج، قارن تسلسل الجينات بين الأنواع حتى يتمكن من تحديد أين ومتى تطورت. باستخدام عينات الأنسجة من كل أنواع السَّمندل تقريبًا، رسم ويك شجرة العائلة الأكثر تفصيلًا للسمندل حتى اليوم. حتى هو نفسه كان مصدومًا من النتيجة.

---

(97) بحث ويك الأصلي حول اندفاع اللسان من الكلاسيكيات:

R. E. Lombard and D. B. Wake, "Tongue Evolution in the Lungless Salamanders, Family Plethodontidae IV. Phylogeny of Plethodontid Salamanders and the Evolution of Feeding Dynamics," Systematic Zoology 35 (1986): 532–51.

السهادل ذات الألسنة المقذوفة الأكثر تطرفًا ليست قريبة النسب لبعضها.

في الواقع، كانت تلك الأنواع مُتباعدة جدًّا في شجرة العائلة لدرجة أنَّها عاشت على بُعد مئات الأميال من بعضها، وكان لها أسلاف مختلفون. إنَّ ابتكار اللسان المقذوف، وهو بدعة بيولوجية معقدة تتضمن العديد من التغييرات المنسقة في الرأس والجسم، حدث على الأقل ثلاث مرات بشكلٍ مستقل، وربما أكثر. وفي جميع الحالات، فُقدت العضلة اللسانية الذقنية، وعُدلت عظام الخياشيم لتصبح مقذوفات، وتحورت عضلات البطن إلى زنبرك لإعادة المقذوف إلى الفم. هذه الألسنة هي أمثلة على متكررات السيد راي لانكستر على نطاق أوسع.

إنَّ الابتكار المستقل لهذا الجهاز المتخصص للغاية ليس من قبيل المصادفة، فجميع الأنواع التي تملك هذه الصفة تشترك في أشياء عدة. تستخدم معظم السهادل عظام الخياشيم في التنفس لتوسيع الفم وسحب الهواء داخل الرئتين. وتستخدم عظام الخياشيم تلك على نطاق واسع في مراحل اليرقات للتغذية، فحركات هذه العظام تولد الشفط اللازم لسحب الطعام إلى الداخل. لكن إذا كانت عظام الخياشيم ضرورية للتنفس والتغذية، فكيف يمكن استخدامها في إطلاق اللسان؟ الأنواع ذات القدرة الأكثر تطرفًا على إطلاق اللسان ليس لديها رئات ولا أطوار يرقات. وبعد أن فقد كليهما، لم يعد الجهاز الخيشومي يؤدي تلك الوظائف المنافسة، ويمكن

استخدامه في وظيفة جديدةأي مقذوفًا للقبض على الفريسة.[98]

ولكن كيف تظهر المتكررات؟ وماذا تخبرنا عن الآليات الداخلية في الكائنات الحية؟

الفوضى هي الرسالة:

يكره العلماء، مثل معظم البشر، الفوضى.

يحب العلماء الرسوم البيانية التي تتسق فيها النقاط بدقة على خط أو منحنى. إننا متعطشون إلى التجارب الحاسمة. الملاحظات المثالية بالنسبة لنا محكمة ومرتبة وتتبع الفرضيات بشكلٍ متجانس. نحن نحب الإشارات ونكره التشويش.

ودراسات شجرة الحياة لا تختلف عن ذلك، فإن بناء شجرة عائلة الحياة يشبه إلى حدٍّ ما ابتكار مفتاح للتعرف على الأنواع في البرية، فنحن نبحث عن السمات الفريدة التي تشترك فيها الحيوانات، وكلما كانت السمات الفريدة للنوع أكثر، كان من الأسهل تمييز ذلك النوع عن الأنواع الأخرى. يستطيع الجميع التمييز بين النوارس والبوم، على سبيل المثال. ولكل منها ميزات تعمل كمُحددات، سواء أكانت وجه البوم المستدير أم منقار النورس ولون الجسم. يكمن الاتساق في وجود سمات، من التَّشريح إلى الحمض النووي، تتقاسمها مجموعات مختلفة من المخلوقات. يشترك البشر في سمات لا تظهر في

---

(98) للاطلاع على التطور المتكرر المذهل لإطلاق اللسان:

D. B. Wake et al., "Transitions to Feeding on Land by Salamanders Feature Repetitive Convergent Evolution," 395–405, in K. Dial, N. Shubin, and E. L. Brainerd, eds., Great Transformations in Vertebrate Evolution (Chicago: University of Chicago Press, 2015).

الرئيسيات الأخرى، وتشترك الرئيسيات في سمات لا تظهر في الثدييات الأخرى، وتشترك الثدييات في سمات لا تظهر في معظم الزواحف، وهكذا.

كشف راي لانكستر عن مشكلة من نوع مَن جاء أولًا الدجاجة أم البيضة؟ فكيف نميز أوجه التشابه التي تطورت بشكلٍ مستقل، أو المتكررات، عن أوجه التشابه التي تعكس قرابة النسب الحقيقية؟ إذا كان من الممكن أن تنشأ ألسنة السَّمندل، بكل تفاصيلها المعقدة، بشكل مستقل، فكيف يمكننا أن نثق في أن وجود أي سمة يقدم دليلًا على القرابة؟ والحقيقة هي أن الألسنة، في السَّمندل، ليست سوى جزء واحد من القصة.

تظهر المتكررات في عضو بعد عضو.

إذًا كيف ينظر أكبر خبير في العالم في مجال السَّمندل إلى تطوره؟ لقد تخلى ديفيد ويك، مثل الكثيرين غيره في هذا المجال، عمليًّا عن استخدام علم التَّشريح كمؤشر على القرابة. لماذا؟ لأنه بصرف النظر عن كم البيانات التي تُجمع، فمن الواضح جدًّا أن السهادل في أجزاء مختلفة من العالم، وفي أوقات مختلفة، توصلت إلى نفس التصاميم بشكل مستقل.

ربما لا تكون الفوضى الملاحظة في المتكررات البيولوجية مجرد مصدر إزعاج، بل هي نافذة على شيء جوهري. ربما ما نراه تشويشًا هو في الحقيقة إشارة. ماذا لو كانت بعض طرق التطور غير عرَضية؟

تظهر المتكررات في الكائنات الحية بإحدى طريقتين. الأولى هي وجود عدد محدود من الحلول للمشكلة. خذ الطيران مثلًا. يحتاج أي

مخلوق يطير إلى مساحة سطح كبيرة ليستطيع التحليق، لذا فإن جميع الكائنات الطائرة لها أجنحة. تبدو أجنحة الطيور والزواحف الطائرة والخفافيش والذباب متشابهة، لكن لها هياكل مختلفة في الداخل وتاريخًا مختلفًا يمكننا تتبعه. يختلف تكوين العظام في جناح الطائر عن تلك الموجودة في الخفافيش أو التيروصورات. وفي الخفاش، الجناح عبارة عن غشاء يمتد بين خمسة أصابع ممدودة، بينما في التيروصورات يكون الجناح مدعومًا بإصبع رابع طويل جدًا. وأجنحة الحشرات تختلف عن كليهما، حيث تدعمها أنواع مختلفة تمامًا من الأنسجة. تجتمع الضرورة الجسدية والتاريخ لإنتاج هذه الهياكل - كل هيكل عبارة عن جناح، ولكنه يتكون بشكل مختلف ليعكس التاريخ التطوري المختلف لـ: الثدييات، والطيور، والزواحف، والحشرات.

والأمثلة على هذا النوع من الضرورات الجسدية كثيرة، وكثيرًا ما أطلق عليها علماء التَّشريح الأوائل اسم: «القواعد».

تنص قاعدة ألين التي صاغها جويل أساف ألين في عام 1877 على أن الحيوانات ذوات الدم الحار التي تعيش في المناخات الباردة تكون لها زوائد أقصر: (أطراف، وآذان، وأنوف، وما شابه ذلك) من تلك التي تعيش في المناخات الأدفأ. والتفسير هو فقدان الحرارة، فالحيوانات التي لها زوائد طويلة تفقد حرارة أكثر من تلك التي لا تمتلكها. وبالمثل، فإن قاعدة بيرجمان، التي سُميت نسبة كارل بيرجمان في عام 1844، تشير إلى ملاحظة تقول: إن الحيوانات التي تعيش في المناخات الباردة تكون في المتوسط أكبر حجمًا من تلك الموجودة في

المناخات الأدفأ. وفقدان الحرارة هو المُحدد هنا أيضًا؛ لأن الحيوانات الصغيرة لديها مساحة سطح نسبية أكبر يمكن أن تفقد من خلالها الحرارة. بشكل عام، تصدق قاعدة ألين وقاعدة بيرجمان على الأنواع المختلفة التي تعيش في أماكن مختلفة.

هناك طريقة أخرى يمكن أن تظهر بها المتكررات. أدرك داروين أنه لا يوجد مخلوقان متشابهان في جماعة، وأن بعض أنواع الاختلاف يمكن أن تجعل الكائن أنجح في بيئته، من خلال إنجاب المزيد من النسل، وأن يكون أقوى. هذه الاختلافات هي أساس التطور عن طريق الانتخاب الطبيعي: طالما أن هناك تباينًا في الجماعة، وبعضه يؤثر في نجاح الكائنات في بيئتها، فإنَّ التغير التطوري نتيجة حتمية، لكن الانتخاب الطبيعي لا يمكن أن يعمل إلا على التنوع الموجود في مجتمعٍ ما. إذا لم تكن هناك اختلافات بين الأفراد، فلن يكون هناك تطور. وماذا لو كان التباين منحازًا بطريقةٍ ما؟ ماذا لو كانت الوصفات الجينية والجنينية التي تبني الأجسام والأعضاء قادرة على إنتاج تصاميم محددة بطريقةٍ أسهل من غيرها، أو لا تنتج غيرها على الإطلاق؟ إذا كان هذا صحيحًا، فإنَّ معرفة كيف تبني الحيوانات الأعضاء في أثناء النُّمو يمكن أن تساعدك في التنبؤ بكيفية اختلافها في الجماعات، وبالتالي، الطرق المحتملة التي يمكن أن تتطور بها.

أقدام باردة:

بعد الانتهاء من دراساتي العليا في جامعة هارفارد، انتقلت غربًا إلى جامعة كاليفورنيا في بيركلي لأدرس في بعض متاحف علم الحيوان وعلم الحفريّات الشهيرة فيها. بعد بضعة أسابيع في المكان،

جذبني حماس ديفيد ويك المعدي تجاه السَّمندل، وبدأت في تصميم مشاريع يمكنني تنفيذها مع فريقه. لقد كنت منجذبًا إلى كاليفورنيا؛ بهدف تغيير المناخ بقدر ما انجذبت إلى المتاحف والسَّمندل. فخمس سنوات قضيتها في كامبريدج، ماساتشوستس، وفي العمل الميداني الصيفي في جرينلاند وكندا، جعلتني مستعدًا للابتعاد عن الظلام والبرد؛ لكي أستحم في شمس كاليفورنيا.

لكنني لم أجد ذلك النعيم المشمس. عندما وصلت، كانت بيركلي تعاني من واحدة من أشد موجات البرد في الذاكرة الحديثة. وسرعان ما علمت أنه لا شيء، ولا حتى خيمة في جرينلاند، أبرد من كاليفورنيا في البرد. كانت المنازل والناس، بما فيهم أنا، يفتقرون إلى العزل. تجمدت الأنابيب في كل أنحاء المدينة، ووُزعت المياه بالحصص. لم أعرف ذلك حينها، لكن صقيع كاليفورنيا المفاجئ كان له تأثير في تفكيري حول تاريخ الحياة.

في مرحلةٍ ما أثناء الصقيع، ذهبت إلى مختبر ويك، فقط للدفء وملء بعض أباريق الماء. كان قد أغلق الهاتف لتوه مع زميل له في إدارة المتنزهات الوطنية في شاطئ بوينت ريس الوطني. ضربت موجة البرد بحيرات المياه العذبة في المتنزه بقوة، مما أدى إلى تجمدها لأول مرة منذ عقود، وكانت الحيوانات، مثل البشر، غير مستعدة لانخفاض درجة الحرارة. وكان الغرض من المكالمة هو إبلاغه بأن الآلاف من السمادل قد تجمدت حتى الموت في تلك البرك، وأرادت إدارة المتنزه معرفة ما إذا كنا نرغب في الاستفادة منها في مجموعة متحف علم الحيوان. لقد نفقت الحيوانات بالفعل؛ بسبب كارثة

طبيعية، فلماذا لا نرى ما يمكن أن يستخلصه العلم منها؟

أصبح لدينا تحت تصرفنا أكثر من ألف سمندل متاح للدراسة. في جامعة هارفارد، درست أطراف السَّمندل، وبحثت في كيفية تطور أيديه وأقدامه في المراحل الجنينية. ونظرًا لاهتمامي، قمنا بتطوير خطة لدراسة أقدام تلك السمادل لتقييم الهياكل العظمية بداخلها. في وجود قدمين لكل سمندل، وصلنا إلى ما يقارب من ألفي قدم يمكننا دراستها.

لم تكن حماستي للحصول على ألفي قدم سمندل شيئًا سخيفًا.

كنت قد انتهيت قريبًا من التدريس في فصل جولد وأردت اختبار إلى أي مدى قد يكون التطور عرضيًا أو حتميًا. كنا نرى المتكررات في كل مكان، من الألسنة إلى المتكسات، ومن السَّمندل إلى الجمبري.

في الواقع، كلما بحث الناس أكثر، وجدوا المزيد.

اكتشف ويك أنَّ أقدام السَّمندل تتطور بطرق محددة للغاية، وكما كانت الحال في نظام اللسان، تتطور الأنواع المختلفة بنفس الطريقة بشكل مستقل.

وبفضل الصقيع، كانت لدينا آلاف الأقدام من جماعة واحدة من نوعٍ واحد. كانت فكرتنا هي النظر إلى أنماط أطرافها لتقييم مدى اختلافها بين الأفراد. وهذا هو النوع من التباين الذي هو وقود التطور عن طريق الانتخاب الطبيعي. يمكننا الآن أن نطرح الأسئلة المركزية، فهل التباين في الجماعات منحاز بطريقةٍ ما؟ هل تظهر المتكررات لأن وقود الانتخاب الطبيعي، أي: التباين بين الأفراد،

ليس عشوائيًّا؟ إذا كانت جميع أنماط الأطراف متساوية في احتمال ظهورها، فلا بد أن نرى تباينًا عشوائيًّا في العينة الضخمة من السَّمندل المتجمد من بوينت رييس. ولكن ربما يكون هناك بعض التحيز الداخلي الخفي للتباين يدفع التطور في اتجاهات محددة.

خلال أكثر من 200 مليون سنة من التطور، تطورت أطراف السَّمندل مثل منتكسات لانكستر، فهي تفقد البِنى بدلًا من اكتسابها. تظهر العديد من السمات في هياكلها العظمية مرارًا وتكرارًا، سواء أتطورت الأنواع في الصين أم أمريكا الوسطى، أم أمريكا الشمالية. أولًا، تتجه إلى فقد الأصابع، ودائمًا نفس الأصابع. عندما يفقد السَّمندل أصابع يديه أو أصابع قدميه، فإنه يفقدها دائمًا على جانب الخنصر، وليس العكس أبدًا. النمط الثاني هو أنها تميل إلى التطور عن طريق دمج عظام الرسغ والكاحل. لدى السَّمندل عادة تسعة عِظام في كاحله. تميل الأنواع المُتخصصة إلى فقدان العظام بطريقة محددة جدًّا، حيث تُدمَج العظام المتجاورة، وحيث يكون لدى السلف عظمتان منفصلتان، قد تكون لدى النسل عظمة واحدة كبيرة. ما لاحظه ويك هو أنَّ أنماط الاندماج هذه تبدو غير عشوائية. تحدث بعض الاندماجات مرة بعد مرة، في حين أنَّ بعضها الآخر لا يحدث أبدًا.

في المتاحف أو حدائق الحيوان أو حتى في البرية، لا يحدث أبدًا تقريبًا أن يتمكن العلماء من الحصول على ألف هيكل عظمي لنوع واحد. كان هذا العدد من العينات بمثابة منجم؛ لأننا أصبح لدينا الآن الأعداد اللازمة لجمع بعض الإحصائيات الحقيقية واختبار

الأفكار. ويمكننا أن نرى ما إذا كان التباين متحيزًا، وبالتالي، يمكن أن يؤثر في كيفية تطور السَّمندل. لكن كان التحدي هو رؤية ما بداخل أقدامها.

لم يكن بإمكاننا أن نصور الأطراف بالأشعة السينية ببساطة، فكانت هياكلها مصنوعة من غضاريف ناعمة يكاد يكون من المستحيل التقاطها بالأشعة السينية الطبية القياسية. أيضًا كان عدد الحيوانات كبير جدًّا، بحيث يمكن فحصها جميعًا في جهاز التصوير بالأشعة المقطعية، وكانت التكلفة ستصبح فلكية، ولم يكن السَّمندل مشمولًا في تأميني الصحي، ثم اخترنا تقنية كانت نتائجها جميلة بقدر ما كان الاختبار بسيطًا، فأعددنا سلسلة من حمامات الكحول والماء، وبعض الأصباغ الكيميائية. على مدى بضعة أسابيع، نقلنا السمادل من حمام إلى آخر، وأبقيناها في كل منها فترة كافية للسماح للسوائل بالانتشار في الأنسجة. كان بالحمام الأخير صبغة زرقاء خاصة تلتصق بالغضاريف، وتميزها جميعًا باللون الأزرق المخضر. ثم، في المشهد الأخير، وضعنا السَّمندل في حمام من الجلسرين العادي، وهو سائل لزج شفاف. عندما يدخل الجلسرين إلى جسد العينة، يجعلها شفافة مثل الزجاج. قد تستغرق العملية بالنسبة السَّمندل الكبير بضعة أسابيع. وعندما نفذناها بالشَّكل الصحيح، حصلنا في النهاية على شيء جميل بشكل غريب. كان الحيوان شفافًا، والهيكل أزرق اللون، وكأنه تحول إلى هيكل أزرق داخل زجاج.



ضفدع أصبح جسده شفافًا وعظامه ملونة بالأصباغ

لقد احتجنا إلى عامين لإعداد ألف من تلك التحضيرات. ورقّمنا كل طرف في كل عينة، وسجلنا كل: شكل، واندماج، وخسارة.

ووجدنا أنَّ الاختلاف لم يكن عشوائيًّا، فالإجابة كانت واضحة تمامًا مثلما كانت أجسادها في الجليسرين. اندمجت العظام وفقدت أصابع محددة. وفوق ذلك، رأينا نفس أنماط التباين في هذه المجموعة من السَّمندل من بوينت رييس التي شُوهدت في الأنواع الأخرى من الصين والمكسيك وحتى ولاية كارولينا الشمالية. كانت بعض أنماط الاندماج محتملة، والبعض الآخر لا. وفي كل حالة، كنا نرى نفس مجموعة الأنماط مرارًا وتكرارًا.

بماذا يمكن أن يخبرنا ذلك عن بيولوجيا السَّمندل، ناهيك عن ثنائية العرَضية والحتمية؟

كنت قد قضيت سابقًا فترتي في الدِّراسات العليا في دراسة كيفية تشكل أطراف السَّمندل في أثناء النُّمو.

بدراسة تكون عظامها، ظهر تسلسل واضح لكيفية تشكل العظام. تتشكل الأصابع بترتيب دقيق للغاية، ويتشكل الإصبع الثاني أولًا، ثم يليه الأول، ثم الثالث، والرابع، والخامس.

لقد رأيت هذا التسلسل من قبل - وهو بالضبط الترتيب الذي تُفقد به الأصابع في أثناء التطور. الإصبع الأول الذي يُفقد هو آخر إصبع تكون، والتالي، قبل الأخير. بدا أن هناك تنظيمًا لكيفية فقدان الأصابع: آخرها تكونًا هو أولها فقدًا.

تنمو الغضاريف الموجودة في الرسغين والكاحلين أيضًا بتسلسل محدد بدقة، فهي تتبرعم من بعضها.

تتشكل إحداها، ثم تتبرعم الأخرى منها، وينفصل هذان العنصران مع تبرعم عناصر جديدة أخرى.

يؤدي هذا التبرعم والانفصال إلى تكوين نمط كامل من تسع عظام مستقلة، وقد رأيت هذا من قبل أيضًا. العناصر التي اندمجت في السمادل من الأنواع المختلفة كانت دائمًا هي ذاتها التي تبرعمت في الوضع الطبيعي من بعضها.[99]

---

(99) للاطلاع على تحليل السمندل المجمد:

N. H. Shubin et al., "Morphological Variation in the Limbs of Taricha Granulosa (Caudata: Salamandridae): Evolutionary and Phylogenetic Implications," Evolution 49 (1995): 874–84.

نُوقش التفسير التطوري وإمكانية التنبؤ بأنماطها في:

N. Shubin and D. B. Wake, "Morphological Variation, Development, and Evolution of the Limb Skeleton of Salamanders," 1782–808, in H. Heatwole, ed., Amphibian Biology (Sydney: Surrey Beatty, 2003); N. Shubin and P. Alberch, "A Morphogenetic Approach to the Origin and Basic Organization of the Tetrapod Limb," Evolutionary Biology 20 (1986): 319–87; N. B. Fröbisch and N. Shubin, "Salamander Limb Development: Integrating

تحت هذا التَّشريح والنُّمو المتخصص للغاية تكمن فكرة بسيطة وقوية.

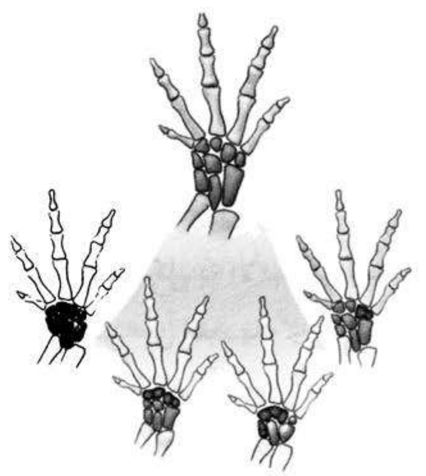
إذا كنت تعرف كيف ينمو طرف السَّمندل، فيمكنك التنبؤ بكيفية تطوره المحتمل.

إنَّ التسلسل الذي تتشكل به الأصابع، والنمط الذي تنبت به عظام الرسغ والكاحل من بعضها، يحددان أنَّ بعض مسارات التغيير ستكون أكثر احتمالية من غيرها.

إن آخرها تشكلًا هو أولها فقدًا وهو ما يفسر التباين الذي نراه في أصابع السَّمندل. والاندماجات ليست عشوائية أيضًا. فالعناصر التي تندمج هي ذاتها التي تتبرعم عادة من بعضها في أثناء النُّمو.

تخيل التطور الجنيني كعملية بناء. إذا كنت عامل بناء، فإن الطريقة التي تبني بها منزلًا، والمواد التي تستخدمها في بنائه، يمكن أن تؤثر في نوع المنزل الذي تبنيه. يُرجح أن تُبنى بعض أنواع المنازل أكثر من غيرها. وكما رأينا مع أقدام السَّمندل المجمدة، فإنَّ الأمر نفسه ينطبق على الحيوانات. إنَّ الطرق التي تُبنى بها تجعل بعض الابتكارات والتغيرات أكثر احتمالية من غيرها.

Genes, Morphology, and Fossils," Developmental Dynamics 240 (2011): 1087–99; N. Shubin and D. Wake, "Phylogeny, Variation and Morphological Integration," American Zoologist 36 (1996): 51–60; and N. Shubin, "The Origin of Evolutionary Novelty: Examples from Limbs," Journal of Morphology 252 (2002): 15–28.



تتطور أطراف السَّمندل بفقد العناصر. تظهر هنا الطرق التي تندمج بها العظام المجاورة في أثناء التطور.

لفترة طويلة، كان يُنظر إلى المتكررات، مثل العظام الموجودة في أقدام السَّمندل، على أنها أخطاء محيرة في تاريخ الحياة، تقريبًا مثل الحالات الشاذة التي لا تتكرر إلّا لمرة واحدة. لكن، كلما نظرنا إليها أكثر، رأينا أنها جزء ثابت من الطريقة التي يحدث بها الابتكار. وفي كثير من الحالات، تعكس قواعد التغيير العميقة، والتحيزات الجوهرية التي تأتي من كيفية بناء الأنواع في أثناء النُّمو. إذا كانت كل الحيوانات تقريبًا تستخدم نسخًا من نفس الجينات -حتى من الوصفات الجينية الكاملة- لبناء أجسامها، فينبغي ألا يكون وجود التكرار بعد التكرار في مملكة الحيوان أمرًا مفاجئًا. إن حدوث الابتكارات العظيمة في تاريخ الحياة لا ينبغي أن يُعد عرضيًّا بأي

حال.[100]

إنَّ مسار التطور ليس خطًّا متصلًا من التقدم يحركه التغيير العشوائي. على مدار التاريخ، كثيرًا ما سلكت الأنواع المختلفة طرقًا مختلفة إلى نفس الوجهة. للتعبير عن هذه الظاهرة بمصطلحات جولد، أعد تشغيل شريط الحياة، لكن ضع ظروفًا عرضية مختلفة، ستجد أنَّ الأمور المهمة لن تكون مختلفة، بل ستكون هي ذاتها.

شاركنا إرنست ماير وجهة نظره الخاصة خلال إحدى حفلات الشاي. مرددًا فولتير، قال: إنَّ نتائج التطور ليست «أفضل عالم ممكن»، لكنها «أفضل العوالم الممكنة»[101]. تساعد الجينات والنُّمو الجنيني والتاريخ في تحديد أنواع التغييرات الممكنة.

تجارب الطبيعة:

تُجري الطبيعة التجارب نيابة عنّا.

في الواقع، يمكننا أن نرى في بعضها إعادةً لشريط الحياة، تمامًا كما

---

(100) كتب ويك بعض الأبحاث العامة حول كيفية كشف المتكررات في التطور لآليات التغيير العامة:

D. B. Wake et al., "Homoplasy: From Detecting Pattern to Determining Process and Mechanism of Evolution," Science 331 (2011): 1032–35; and D. B. Wake, "Homoplasy: The Result of Natural Selection, or Evidence of Design Limitations?," American Naturalist 138 (1991): 543–61.

استعراض علمي آخر للمتكررات في التطور:

B. K. Hall, "Descent with Modification: The Unity Underlying Homology and Homoplasy as Seen Through an Analysis of Development and Evolution," Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society 78 (2003): 409–33.

(101) العبارة للايبنتز وسخر منها فولتير في روايته **كانديد**. (المترجم).

فعل جورج بيلي على الجسر في بيدفورد فولز.

تعيش السحالي تقريبًا في جميع جزر البحر الكاريبي، من سانت مارتن إلى جامايكا. حيث توفر هذه الجزر، بغاباتها الخضراء وسهولها المفتوحة وشواطئها، مجموعة من البيئات الغنية التي يمكن أن تزدهر فيها السحالي. وقد وجدتها أجيال من العلماء مختبرًا طبيعيًّا لدراسة التطور. وكما كانت جزر جالاباجوس بالنسبة لداروين، تمثل كل جزيرة في منطقة البحر الكاريبي طريقة لتقييم مدى تكيف السحالي المختلفة مع البيئات المختلفة.

كان إرنست ويليامز (1914-1998) أحد أعظم علماء الزواحف والبرمائيات في جيله. بدراسة أعمال الآخرين، لاحظ أنَّ العديد من جزر الكاريبي بها سحالي متماثلة. تتخصص السحالي في الغابات بالعيش في أجزاء مختلفة من الشجرة: بعضها في القمة، والبعض الآخر على الجذع، والبعض الآخر قُرب الأرض، عند قاعدة الجذع. كل السحالي التي تعيش في قمم الأشجار، بصرف النظر عن الجزيرة، تكون كبيرة الحجم ولها رأس كبير وعرف يشبه المنشار على ظهرها، ولونها أخضر داكن. وكل السحالي التي تعيش على الجذع تكون متوسطة الحجم، ولها: أطراف قصيرة، وذيل قصير، ورأس مثلث. وكل السحالي التي تعيش بين الجذع والأرض لها رأس كبير وأرجل طويلة ولونها بني في الغالب.

بتوجيه من ويليامز، اتخذ زميلي جوناثان لوسوس هذه السحالي محورًا لحياته المهنية. استخدم لوسوس تقنيات الحمض النووي لاستكشاف العلاقات بين السحالي في الجزر المختلفة. عندما تنظر

إلى تشريحها، قد تتوقع أن السحالي ذات الرأس الكبير التي تعيش في قمم الأشجار ستكون أقرب ارتباطًا بالسحالي ذات الرؤوس الكبيرة الموجودة في الجزر الأخرى، وكذلك السحالي قصيرة الأطراف التي تعيش على جذوع الأشجار والسحالي ذات الأطراف الطويلة قُرب الأرض. لكن ليس ذلك ما وجده لوسوس. بل كانت السحالي الموجودة في كل جزيرة أقرب ارتباطًا بالأخريات الموجودة على جزيرتها. تضم كل جزيرة مجموعة من السحالي المتميزة وراثيًّا التي استعمرتها بشكلٍ منفصل. جاء المنبوذون في وقتٍ ما إلى كل جزيرة، وتكيف أحفادهم مع ظروف موطنهم الجديد بشكل مستقل. تخيل كل جزيرة على أنها تجربة تطورية منفصلة، تكيفت فيها السحالي مع الحياة على الأرض، وعلى جذوع الأشجار، وعلى الأغصان، وفي القمة. إذا كانت كل جزيرة تجربة منفصلة، فإنَّ التطور قد أنتج نفس النتيجة مرة بعد مرة. ولو أعيد شريط التاريخ في جزر مختلفة لحدث التطور بنفس الطريقة في كل واحدة منها.[102]

وينطبق نفس الوضع على نطاق أكبر بالنسبة للثدييات. لقد تطورت الجرابيات في أستراليا بمعزل عن بقية العالم لأكثر من 100 مليون سنة، وأنتجت أنواعًا متنوعة بأشكال أجسام مختلفة. والنتيجة بالتأكيد ليست عشوائية. هناك السنجاب الطائر الجرابي، والخلد الجرابي، والقط الأرضي الجرابي، وحتى جرذ الأرض الجرابي. وتلك هي فقط الحيوانات التي لا تزال موجودة اليوم – فالأسود الجرابية،

(102) الأبحاث على السحالي الكاريبية مذكورة في: مصائر غير محتملة.

Jonathan Losos, Improbable Destinies: Fate, Chance and the Future of Evolution (New York: Riverhead, 2017).

والذئاب الجرابية، وحتى القطط الجرابية سيفية الأسنان انقرضت الآن. كثيرًا ما تبع تطور الجرابيات في القارة المعزولة مسارات مُشابهة لتلك التي تبعتها الثدييات في بقية العالم.

تكشف هذه التجارب الطبيعية أنَّ تاريخ الحياة ليس مجرد مقامرة من الأحداث العرضية.

هناك تحيزات في الطرق التي تبني بها الجينات والنُّمو في الأجسام، وفي القيود المادية للبيئات، وفي التاريخ. في كل جيل، ترث الكائنات الحية وصفاتٍ - مكتوبة في جيناتها وخلاياها وأجنتها - لبناء الأعضاء والأجسام. يخاطب هذا الميراث المستقبل؛ لأنه يستطيع أن يجعل مسارات محددة للتغيير محتملة أكثر من غيرها. يندمج الماضي والحاضر والمستقبل في أجسام وجينات جميع الكائنات الحية.[103]

(103) كان مختبر ريتش لينسكي في جامعة ولاية ميشيجان يجري تجربة طويلة الأمد على البكتيريا بدأت في عام 1998. وقد سمح هذا المشروع الذي كان جريئًا في ذلك الوقت، بالمراقبة المباشرة للعديد من الأنواع الرئيسة من التغير التطوري، ما منحنا الأدوات اللازمة لرؤية تلك الأحداث في أثناء وقوعها. يكشف هذا الاستعراض عن العلاقة المعقدة بين الحتمية والمصادفة في التطور:

Z. Blount, R. Lenski, and J. Losos, "Contingency and Determinism in Evolution: Replaying Life's Tape," Science 362:6415 (2018): doi: .10.1126/scienceaam5979

الفصل الثامن

عمليات الدمج والاستحواذ

أحيانًا، لا يكون العالم مستعدًا لتقبل ابتكار أو فكرة جديدة. صمم ليوناردو دافنشي (1452-1519) آلات الطيران، بما فيها الطائرات الشراعية، في القرن السادس عشر، لكنها لم تُصنع؛ لأنه لا المواد ولا العمليات اللازمة لبنائها كانت متاحة في ذلك الوقت. يعمل تاريخ الحياة بنفس الطريقة. لقد عاشت الأسماك ذات الرئات والأذرع في المياه القديمة قبل أن تلتقط أنفاسها الأولى وتخطو على الأرض الصلبة، لكن لم يكن ممكنًا قط أن تتمكن تلك المخلوقات من البقاء على اليابسة؛ لأن النباتات والحشرات لمَّا تكن بعد بالوفرة التي تضمن بقاء أي حيوان كبير. في الابتكار التوقيت هو كل شيء، سواء أكان توقيت التطور، أو ظهور التقنيّة البشرية، أو حتى كفاح عالمة شابة في الستينيات.

درست لين مارجوليس (1938-2011) الحياة الميكروبية في جامعة شيكاغو وفي بيركلي. وفي أحد مشاريعها البحثية الأولى، بحثت في تنوع الخلايا في الكائنات الحية واقترحت نظرية جديدة لكيفية نشوئها. كتبت البحث، لكنه رُفض من «خمس عشرة مجلة أو نحو ذلك»، كما قالت في إحدى المرات. لم تتأثر بالرفض، فوجدت

في النهاية مكانًا لنشر البحث في مجلة غامضة نسبيًّا عن علم الأحياء النظري. كان إصرار مارجوليس الشجاع في مواجهة جوقة من التقييمات السلبية مذهلًا - كانت عالمة شابة في بداية حياتها المهنية في مواجهة العقيدة الراسخة في مجال يهيمن عليه الذكور.



لين مارجوليس

ركزت مارجوليس على الخلايا التي تتألف منها أجسام: الحيوانات، والنباتات، والفطريات. هذه الخلايا بها تعقيد لا يوجد في الخلايا البكتيرية. وتحتوي كل منها نواة يوجد فيها الجينوم. يحيط بالنواة عدد من الأعضاء الصغيرة، تسمى: «العضيّات» التي تؤدي وظائف مختلفة. وأبرز العضيّات هي تلك التي تزود الخلية بالطاقة. في النباتات توجد البلاستيدات الخضراء التي تحتوي الكلوروفيل

الذي يؤدي تفاعلات التمثيل الضوئي اللازمة لتحويل ضوء الشمس إلى طاقة قابلة للاستخدام. وبالمثل، تحتوي الخلايا الحيوانية الميتوكوندريا التي تولد الطاقة من الأوكسجين والسكريات.

لاحظت مارجوليس أن تلك العضيّات تبدو كأنها خلايا صغيرة داخل الخلية. ولكل منها غشاء خاص يحيط بها، ويفصلها عن بقية الخلية. تتكاثر العضيّة داخل الخلية عن طريق الانقسام، أو التبرعم في البداية تستطيل وتضيق من المنتصف مثل: الدمبل، ثم ينفصل الجانبان ليكونا فردين جديدين. حتى أن العضيّات لها جينوم خاص، منفصل عن جينوم نواة الخلية. لكن جينوم العضيّة يختلف كثيرًا عن جينوم النواة. يلتف شريط الحمض النووي الموجود في النواة على نفسه، ولكن في الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضراء، تتصل نهايات شريط الحمض النووي لتشكل حلقة بسيطة.

تلك العضيّات بهذا التنظيم الذي تتمتع به في وجود أغشيتها، وتكاثرها، وتنظيم الحمض النووي الخاص بها، ذكّرت مارجوليس بشيءٍ ما. لقد رأت هذه السمات من قبل، في البكتيريا وحيدة الخلية والطحالب الخضراء المزرقة. تتكاثر البكتيريا والطحالب الخضراء المزرقة عن طريق التبرعم، ويحيط بها غشاء مماثل، ولها جينوم يشبه إلى حدٍّ كبير جينوم البلاستيدات الخضراء والميتوكوندريا.

إن العضيّات التي تزود الخلايا الحيوانية والنباتية بالطاقة، من بين كل الأشياء بدت أقرب إلى البكتيريا والطحالب الخضراء المزرقة أكثر منها إلى نواة الخلية التي تعيش فيها.

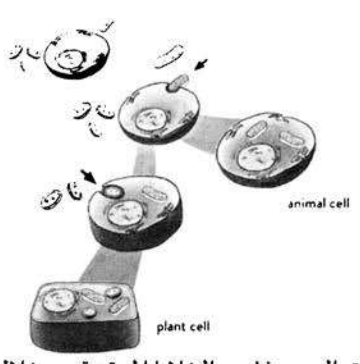
بالاعتماد على تلك الملاحظات، اقترحت مارجوليس نظرية

جديدة جذرية للتاريخ التطوري. لقد كانت البلاستيدات الخضراء في الأصل عبارة عن طحالب خضراء مزرقة تعيش حرة، ثم دُمجت في خلية أخرى واستُغلت للعمل في الأيض لتوفير الطاقة لها. وبالمثل، كانت الميتوكوندريا في الأصل بكتيريا حرة اندمجت مع خلية أخرى واستُغلت في إمدادها بالطاقة. كانت فكرتها الراديكالية هي أنه في الحالتين يجتمع أفراد مختلفون معًا لتكوين فرد جديد أكثر تعقيدًا.

ولأنها ورقة بحثية تعرضت لخمسة عشر رفضًا، فقد قُوبِلت فكرة مارجوليس بازدراء واسع أو باللامبالاة التامة. لم تكن مارجوليس تعلم أن علماء أحياء روس وفرنسيون قد اقترحوا بشكلٍ مستقل، قبل ستين عامًا، فكرة مماثلة تعرضت للسخرية وظلت مخفية في المجلات الغامضة. لكن أسلوب مارجوليس الشجاع ومثابرتها وإبداعها أبقى فكرتها حية، حيث أمضت عقودًا عدة في جمع المزيد من الأدلة والجدال بإصرار في العلن. لكن للأسف، لم تكن جهودها مجدية، فقد بقيت على هامش الاحترام؛ لأن أوجه التشابه التي كانت تكشف عنها لم تُقنع أهل المجال.

ولحُسن حظ مارجوليس، والعلم بشكل عام، تمكنت التقنيّة من اللحاق بفكرتها. عندما تطورت طرق سَلسَلة الحمض النووي السريعة في الثمانينيات، أصبحت من الممكن مقارنة تاريخ الجينات الموجودة في العضيّات بتلك الموجودة في نواة الخلية. وقد كانت شجرة النسب التي اكتُشفت جميلة بقدر ما كانت مفاجئة. لم تكن الميتوكوندريا ولا البلاستيدات الخضراء مرتبطة وراثيًّا بالحمض

النووي لنواة خليتها. كانت البلاستيدات الخضراء أقرب نسبًا إلى أنواع مختلفة من الطحالب الخضراء المزرقة أكثر منها لأي شيء آخر داخل الخلية النباتية. وبالمثل، كانت الميتوكوندريا من نسل نوع من البكتيريا المستهلكة للأوكسجين، ولم تكن لها علاقة بأنويتها. تحتوي كل خلية معقدة اثنتين من عائلات الحياة داخلها: إحداهما عائلة نواتها، والأخرى كان أسلافها ذات يوم طحالب خضراء مزرقة أو بكتيريا تعيش بحرية.



التطور عن طريق الدمج: نشوء الخلايا المعقدة من خلال اندماج نوعين مختلفين من الميكروبات (الأسهم)، أحدهما يؤدي إلى ظهور الميتوكوندريا (في الأعلى)، والآخر يؤدي إلى ظهور البلاستيدات الخضراء (في الأسفل)

تُظهر مقارنات الحمض النووي الحديثة أنَّ هذه الأنواع من الدمج كانت أحداثًا شائعة في تاريخ الحياة. وقد نشأت بهذه الطريقة أيضًا خلايا لا علاقة لها بالحيوانات أو النباتات، وبها عضيّات مختلفة. على سبيل المثال، يحتوي البلازموديوم [المتصورة المنجلية] Plasmodium falciparum، وهو الميكروب الذي يسبب مرض

الملاريا، عضيّة غريبة تُشبه القبعة المخروطية تقع على جانبٍ واحد من الخلية. وهي تُستخدم في عددٍ من العمليات الأيضية المختلفة. ويُظهر تسلسل الحمض النووي أنها كانت في السابق طحالب تعيش حرة؛ ونظرًا لتاريخها كخلية مفردة، فإنَّ بالعضيّة جزيئات مميزة تقع على الأغشية المحيطة بها. وقد استُخدمت تلك الجزيئات أفضل استخدام في الطب، فهي هدف تستخدمه الأدوية المضادة للملاريا في مهمة بحث وتدمير لقتل خلايا الملاريا.

نجت مارجوليس من العاصفة، ولكن للأسف، انتهت مسيرتها المهنية في عام 2011، عندما أصيبت بسكتة دماغية في سن الثالثة والسبعين. لقد عاشت لترى تأكيد نظريتها قبل وفاتها. وعندما استعادت ذاكرة مسيرتها المهنية، لخصت مارجوليس نهجها في التعامل مع الخلاف بعبارةٍ بسيطة كانت شعارها خلال عقود من المعارك الأكاديمية: «أنا لا أعُدّ أفكاري مَثار خلاف، بل أعُدّها صحيحة».[104]

الإبداع والشخصية القوية والتقنيّة غيرت كلها الطريقة التي ننظر

---

(104) الورقة الأصلي للين مارجوليس هي:

L. [Margulis] Sagan, "On the Origin of Mitosing Cells," Journal of Theoretical Biology 14 (1967): 225–74.

كتابها واسع النطاق حول نظريتها هو. **التكافل في تطور الخلية:**

Lynn Margulis, Symbiosis in Cell Evolution: Life and Its Environment on the Early Earth (San Francisco: Freeman, 1981).

اقتباسها التذكاري مأخوذ من مقابلة أجريت عام 2011 في مجلة ديسكفر المتوافرة على الإنترنت:

http://discovermagazine.com/2011/apr/16-interview-lynn-margulis-not-controversial-right.

بها إلى تاريخ الحياة، فقد حدثت الثورات العظيمة عندما اندمج أفراد لتكوين كائنات أكثر تعقيدًا، عندما أصبحت الكائنات التي كانت تعيش حرة في السابق أجزاء من كُلٍ أكبر من أي منها. كل نبات وحيوان على وجه الأرض اليوم هو فرد يحتوي تسلسلًا هرميًّا معقدًا من الأجزاء من الأعضاء إلى: الخلايا، والعضيّات، والجينات.[105] والطريقة التي ظهر بها هذا التنظيم هو قصة تمتد لمليارات السنين، وتبدأ في وقتٍ قريب من نشأة الكوكب نفسه.

بعض عمليات التجميع المطلوبة:

كلما تعمقنا في الماضي، أصبحت صورة الحياة أكثر ضبابية. ربما لا أحد يعرف هذا أفضل من ج. ويليام شوبف الذي كان هدف حياته العثور على أدلة على أقدم الكائنات الحية على هذا الكوكب أخذته مطارداته إلى سفوح التلال القاحلة في غرب أستراليا. إنه مكان خاص؛ لأن عمر الصخور يزيد عن ثلاثة مليارات سنة، وهي من بين أقدم الصخور في العالم. وعليه، توافد العلماء هناك لفهم طريقة عمل الأرض الأولى. لقد شهدت تلك الصخور كل شيء تقريبًا، فقد سُخنت، وانضغطت، وارتفعت، وانطرحت على مر العصور

(105) للاطلاع على وجهات النظر الحديثة بما في ذلك المراجع، انظر:

J. Archibald, One Plus One Equals One: Symbiosis and the Evolution of Complex Life (Oxford: Oxford University Press, 2014); L. Eme et al., "Archaea and the Origin of Eukaryotes," Nature Reviews Microbiology 15 (2017): 711–23; J. M. Archibald, "Endosymbiosis and Eukaryotic Cell Evolution," Current Biology 25 (2015): 911–21; and M. O'Malley, "Endosymbiosis and Its Implications for Evolutionary Theory," Proceedings of the National Academy of Sciences 112 (2015): 10270–77.

منذ أن ترسبت لأول مرة. ومهما يكن موجودًا بداخلها في الأصل، بما في ذلك الحفريّات، فقد انخبز أو انسحق في الغالب.

في أثناء استكشاف التكوين الصخري المعروف باسم: «إيبكس تشيرت [قمة الصَّوَّان] «Apex Chert في أوائل الثمانينيات، لاحظ شوبف بعض الصخور التي بدت غير مشوهة نسبيًّا بالنسبة لعمرها. تحتوي الصخور التي تعرضت لدرجات حرارة عالية أو تعرضت لضغوط عالية على معادن مميزة بداخلها تشكلت نتيجة هذا التشوه. كان في إيبكس تشيرت عدد قليل نسبيًّا من تلك المعادن. ولأنه كان يعلم أنها على الأرجح نادرة، أخذ شوبف الصخور إلى المختبر لفحص ما بداخلها. الصَّوَّان، وهي صخرة تشكلت من الطين الموجود في قاع البحر، كثيرًا ما تحتوي بقايا كائنات استقرت في قاع المحيط بعد موتها.

والعمل على الصَّوَّان قد يكون أمرًا صعبًا. تُقطع كل صخرة بمنشارٍ ماسيٍّ، وتُوضع القطع على شريحة تحت المجهر لتحليلها. استعان شوبف باثنين من طلاب الدِّراسات العليا في المشروع، ولكن بعد إنفاق سنتين من العمل لساعات طويلة تحت المجهر، لم يعثروا على شيء. استكمل عملهما طالب ثالث، وبحث لبضعة أشهر، ووجد بعض الخيوط المجهرية داخل الصخور. معتقدًا أنها غير مهمة، وضعها في خزانة العينات لتحليلها لاحقًا. وانتهى ذلك الطالب إلى العمل في وظيفة في الصناعة، وبقيت العينات في الخزانة مدة عامين آخرين.

في أحد الأيام، غير عالمٍ بما كان لديه، سحب شوبف قطع الصَّوَّان

من الخزانة لدراستها. بدت بعض الخيوط المجهرية وكأنها شذرات وأشرطة طويلة وقصيرة. ومعظمها كانت منظمة على شكل سلسلة من اللؤلؤ، تراكيب دائرية صغيرة متصلة ببعضها. كان شوبف قد رأى هذه الأنماط من قبل، في الطحالب الخضراء المزرقة الحية التي تشكل مستعمرات صغيرة. لكن تلك التراكيب الشبيهة بالخلايا جاءت من صخور عمرها ما يقارب من ثلاثة مليارات ونصف المليار سنة. أصدر شوبف بيانًا جريئًا بأنه قد عثر على أقدم الحفريّات على الأرض، وأنها جاءت من صخور تشكلت بعد مليار سنة من نشأة الكوكب والنظام الشمسي.

لم يقتنع الجميع، ومع ضجة المؤيدين جاء الانتقاد العلمي. كان أحد الانتقادات هو أن التراكيب مثل خيوط شوبف يمكن أن تكون نتيجة طبيعية للطريقة التي تشكلت بها الصخور على مدى مليارات السنين. ادعى المنتقدون أن الشظايا لم تكن حفريّات، بل كانت نوعًا من الجرافيت تنتجه الصخور التي انسحقت تحت ضغوط عالية. وامتلأت المجلات بالأوراق التي تناقش إيجابيات وسلبيات ادعاء شوبف. حتى أن شوبف أجرى نقاشًا عامًّا مشهورًا للغاية مع خصم بارز. قد يبدو موضوع الخيوط المجهرية داخل الصخور بعيدًا بشكلٍ مؤلم، لكن القضية المطروحة، وهي فهم أقدم الكائنات الحية، لم تكن بالتأكيد كذلك.

حاول شوبف استخدام أسلوب آخر. وبدلًا من مقارنة أشكال الخيوط والطحالب الخضراء المزرقة، سعى إلى الحصول على دليلٍ آخر حول الحياة الأولى. بعد بضعة عقود من اكتشافه الأصلي،

سمحت التقنيات الجديدة للعلماء بالنظر إلى كيمياء الحبوب الموجودة داخل الصخور والحفريّات المفترضة. يوجد عنصر الكربون في أشكال عة على كوكب الأرض، وبعض أنواع ذرات الكربون تكون أثقل من غيرها. تستخدم الكائنات الحية الكربون في عملية الأيض، وتُفضل استخدام نوعٍ واحد منه. وبسبب هذه الخصوصية الكيميائية، تترك الحياة بصمةً في الصخور بناءً على نسب أنواع الكربون المختلفة بها.[106]

باستخدام مطياف الكتلة، وهو جهاز بحجم غسالة الصحون المنزلية، فحص شوبف وزملاؤه محتوى الكربون في الحبوب الموجودة في الصخور وتلك الموجودة في الخيوط. كانت الخيوط تحمل توقيع كربون الكائنات الحية. والأكثر من ذلك، أنها أظهرت على الأقل خمسة أنواع مختلفة من الكائنات الحية. كانت لدى البعض منها بصمة الكربون للمخلوقات التي استخدمت شكلًا بدائيًا من عملية التمثيل الضوئي. وبدا البعض الآخر مثل الميكروبات المعروفة بتمثيل الميثان كوقود. إذا كان إيبكس تشيرت بمثابة نافذة صغيرة على الأرض القديمة، فقد أظهر أنه قبل ثلاثة مليارات ونصف المليار سنة، كانت الحياة على هذا الكوكب قد بدأت في التنوع بالفعل.

---

(106) عمل شوبف المشترك حول تحليل نظائر الكربون لتراكيب أبيكس تشيرت موجود في:

J. W. Schopf et al., "SIMS Analyses of the Oldest Known Assemblage of Microfossils Document Their Taxon-Correlated Carbon Isotope Compositions," Proceedings of the National Academy of Sciences 115 (2018): 53–58.

نحن نعلم أنه يمكن سبر الصخور بحثًا عن أدلة كيميائية على وجود الحياة. وحتى لو اختفت الحفريّات منذ فترة طويلة، فإنَّ التوقيع الكيميائي للحياة يمكن أن يبقى. إذا كانت المخلوقات تستخدم الكربون في الأيض، فينبغي أن يبقى محتوى الكربون المتغير مثل مخلفات في الصخر. وبعد فحص صخور شرق جرينلاند بحثًا عن الكربون، وجد فريق من جامعة ييل دليلًا على وجود حياة في صخور أقدم حتى من إيبكس تشيرت، وكان عمرها 4 مليارات سنة، وتعود إلى 500 مليون سنة بعد تشكل الكوكب والنظام الشمسي.

ما تظهره هذه الأبحاث هو أنه منذ تلك البدايات الأولى وحتى ملياري سنة مضت، كانت الأرض مأهولة فقط بمخلوقات وحيدة الخلية تعيش بمفردها أو في مستعمرات. جاءت من جينات كل ميكروب مفرد أجيال متتالية - حيث انقسم كل فرد إلى خليتين، وانقسمت الخليتان، ونمت الأجيال بمرور الوقت. كان الابتكار في الغالب يدور حول تطوير أنواع جديدة من التمثيل الغذائي، والتكيفات الكيميائية لمعالجة: الطاقة، والوقود، والنفايات بشكلٍ أكفأ. تستمد بعض الأنواع الطاقة من الكبريت أو النيتروجين، والبعض الآخر من الضوء وثاني أكسيد الكربون. في حين يستخدم البعض الآخر الأوكسجين في إنتاج الطاقة، وقد مهدت تلك المخلوقات وحيدة الخلية الطريق للثورات القادمة.

لقد غيرت عمليات الأيض الميكروبية العالم. لما يقارب ملياري سنة، كانت الطحالب الخضراء المزرقة هي أكثر الكائنات الحية

غزارة على هذا الكوكب. ومن خلال عملية التمثيل الضوئي، استخدمت ضوء الشمس وثاني أكسيد الكربون لإنتاج طاقة نافعة. أمّا نفاياتها، فكانت الأوكسجين. توجد الطحالب الخضراء المزرقة كمستعمرات، إمّا في أشرطة مثل تلك التي وجدها شوبف، أو في مجتمعات على شكل فطر يمكن أن يصل حجمها إلى حجم فرن الميكروويف. منذ ثلاثة مليارات ونصف المليار سنة، كانت تلك المستعمرات غزيرة في أنحاء العالم. ومن خلال ضخ الأوكسجين في الهواء لمليارات السنين، غيرت الغلاف الجوي بشكلٍ جوهري. بعدما كان الغلاف الجوي يحتوي القليل جدًّا من الأوكسجين قبل أربعة مليارات سنة، زادت مستويات الأوكسجين لتكون قادرة على دعم أنواع مختلفة من الحياة.

كان ارتفاع مستويات الأوكسجين بمثابة نعمة ونقمة على الميكروبات. بالنسبة للبعض، كان الأوكسجين سمًّا، بينما بالنسبة للآخرين فتح إمكانيات جديدة. بدأ أحد أنواع الميكروبات في الازدهار، وليس من المستغرب أنه نوع يستطيع أن يستمد طاقته من الأوكسجين.

لمليارات السنين، كانت الكائنات وحيدة الخلية مثل جسم بلا أعضاء، لم تكن لديها عضيّات ذات وظائف متخصصة بداخلها. شُوهدت علامات التغيير لأول مرة في الحفريّات المستخرجة من منجم للحديد في إيشبيمنج، ميتشغان، في عام 1992. تبدو تلك الحفريّات مثل شرائط ملتفة من الخلايا، ويبلغ طولها حوالي ثلاث بوصات ونصف. إنها توجد في صخور يبلغ عمرها حوالي ملياري

سنة، ولها البنية الكلاسيكية لخلية معقدة تحتوي عضيّات. للوهلة الأولى لم يبدُ أن تلك الأشرطة الملتفة تمثل الشيء الكبير، لكنها بشرت بثورة.

عندما تعاونت البكتيريا التي تستخدم الأوكسجين في الأيض مع ميكروب آخر، ظهر نوع جديد من الأفراد على هذا الكوكب. وكما أوضحت مارجوليس، فإنَّ الاندماج لم يكن معناه أن واحدًا زائد واحد يساوي اثنين، فكان الأمر أشبه بواحد زائد واحد يساوي أربعمائة. كان المضيف لهذا الاندماج عبارة عن خلية تحتوي نواة وآلية لتوليد أنواع مختلفة من البروتينات. ومن خلال دمج بكتيريا مستهلكة للأوكسجين وتحويلها لتكون مركز توليد الطاقة بداخلها، امتلكت الخلية المدمجة الجديدة الموارد اللازمة لصنع بروتينات أكثر تعقيدًا والتصرف بطرق جديدة.

لم تعد البكتيريا وحيدة الخلية حرة في العيش بمفردها، لقد أصبحت جزءًا من كل أكبر، فردًا جديدًا أكثر تعقيدًا بأجزاء مختلفة. ولم تعد البكتيريا التي كانت تعيش حرة في السابق قادرة على التكاثر من تلقاء نفسها عند الحاجة، أصبحت وظائفها مُسخّرة في خدمة الخلية المضيفة. وأصبحت الخلية المدمجة الجديدة التي تتمتع الآن بالطاقة اللازمة لتعيش حياة أكثر نشاطًا وبالآلات اللازمة لصنع أنواع جديدة من البروتينات، أصبحت باكورة لتغيير مهم آخر في تاريخ الحياة.[107]

---

(107) من المصادر الأخّاذة والغنية بالمعلومات عن المراحل الأولى من تاريخ الحياة:
Andrew Knoll, Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth (Princeton, NJ: Princeton University Press, 2004); Nick

هيأت الخلايا الجديدة مصانع البروتين فائقة الطاقة، وهيأت العالم لظهور نوعٍ جديد آخر من الأفراد.

معًامرة أخرى:

كل حيوان ونبات على وجه الأرض لديه جسم يتألف من العديد من الخلايا: تذكر أن دودة الربداء الرشيقة C. elegans في جسدها حوالي ألف خلية، بينما لدى الإنسان أربعة تريليونات. وعلى الرغم من الاختلافات الكبيرة في عدد الخلايا، فإنَّ الأجسام تشترك في أوجه تشابه عميقة وقديمة جدًّا.

أول الأجساد ظهورًا في السجل الحفريّ لا تبدو بالشيء الكبير. عُثر عليها في صخور عمرها أكثر من 600 مليون سنة في: أستراليا، وناميبيا، وجرينلاند، وهي مجرد آثار. فكل ما كان داخل الصخرة قد تآكل منذ فترة طويلة. ويتراوح حجمها من حجم العملة المعدنية إلى طبق العشاء، وتبدو مثل: الأشرطة، أو السعف، أو الأقراص. وفي حين أنَّ أشكالها ليست ملهمة، فإنَّ كيفية ظهورها شيء آخر. تلك هي أقدم الحفريّات للحياة متعددة الخلايا، وهي مخلوقات ذات أجسام. كانت الأجسام نفسها وافدًا من نوع جديد تمامًا على كوكب الأرض.

لدى الفلاسفة تعريفات مختلفة لماهية الفرد، ولكن بالمعنى الأساسي، للفرد بداية ونهاية، ولادة وموت، ويمكنه التكاثر،

Lane, The Vital Question: Energy, Evolution, and the Origins of Complex Life (New York: Norton, 2015); and J. William Schopf, Cradle of Life: The Discovery of Earth's Earliest Fossils (Princeton, NJ: Princeton University .Press, 1999)

والأهم من ذلك أن الأجزاء المختلفة بداخله تعمل معًا لتكوّن كلًا فاعلًا. كل واحد منا هو فرد؛ لأن أجسامنا، مثل أجسام النباتات والحيوانات الأخرى، لديها كل هذه الخصائص. وفوق ذلك، تبقى أجسامنا سليمة فقط؛ لأن الأجزاء المُكوِّنة لها تعمل معًا لتشكل كيانات أكبر. على سبيل المثال: هناك تريليونات من الخلايا العصبية التي تشكل الأدمغة، لكنها كخلايا مفردة لا تكشف أبدًا كيف تتشكل: الأفكار، والمشاعر، والذكريات. تستطيع الأدمغة إنتاج الأفكار، في حين أنَّ الخلايا العصبية المفردة لا تستطيع ذلك، فالتفكير هو خاصية عليا تأتي من تنظيم مليارات الخلايا العصبية.[108]

والخلايا المتنوعة داخل الأجسام هي أيضًا أفراد، ولكن بطريقةٍ مختلفة. كل خلية تولد وتموت. كل خلية تتكاثر. ولكل خلية أجزاء بداخلها تتفاعل فيما بينها، لكن تأمل: يحتوي جسم الإنسان ما يقارب أربعة تريليونات خلية. تشكل هذه الخلايا أعضاء، لكل منها: حجمه، وشكله، وموقعه في الجسم. تحتاج الخلايا إلى التكاثر والموت بطريقةٍ منتظمة حتى يصبح: القلب، والكبد، والأمعاء بالحجم الصحيح وفي المكان المناسب في الجسم. إنَّ التنسيق بين الخلايا هو ما يجعل الجسم ممكنًا. لا تتصرف الخلايا كأفراد، بل

(108) نُوقش معنى الفردية وتطورها في كتاب صغير كان له تأثير كبير: تطور الفردية Leo Buss, The Evolution of Individuality (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988).

يركز بوس على ماهية الفرد ويوضح كيف يعمل الانتقاء الطبيعي مع ظهور أفراد جدد ومستويات اختيار جديدة.

يخضع: نموها، وموتها، وحياتها للتنظيم؛ بهدف تكوين جسم قادر. ومن خلال تحديد تكاثرها وموتها في الوقت المناسب، تضحي الخلايا الموجودة داخل الأجسام بنفسها من أجل الصالح الأكبر، وهو أداء الجسم ككل.

هناك آلية جزيئية خاصة تمنح الخلايا القدرة على العمل معًا وتكوين الأجسام، كما يجب أن تكون الخلايا المختلفة قادرة على الالتصاق ببعضها. سيكون من الصعب الحصول على جسم صلب لا تلتصق فيه الخلايا ببعضها بطرق دقيقة للغاية. على سبيل المثال: تتمتع خلايا الجلد بخصائص ميكانيكية خاصة تسمح لها بالارتباط ببعضها لتكوين صفائح من الأنسجة. وهي تصنع: الكولاجين، والكيراتين، والبروتينات الأخرى التي تعطي الأنسجة ملمسها المميز. وأخيرًا، تحتاج الخلايا في الأجسام إلى طرق للتواصل بين بعضها، لتنسيق: تكاثرها، وموتها، ونشاطها الجيني. ومرة أخرى، البروتينات هي طريقة حدوث ذلك: تنقل البروتينات المختلفة رسائل إلى الخلايا تخبرها أين ومتى تنقسم أو تموت أو تفرز المزيد من البروتينات.

والآلية الجينية التي تجعل ذلك ممكنًا هي العائلات الجينية التي ناقشناها في الفصل الخامس. كل جين في العائلة يصنع بروتينًا يختلف اختلافًا طفيفًا عن أبناء عمومته. على سبيل المثال: هناك فئة واحدة من البروتين، الكادهيرين cadherin، توجد في مائة نوع مختلف من الخلايا، كل منها خاص بنوع مختلف من: الأنسجة - الجلد، والأعصاب، والعظام، وما إلى ذلك. تعمل هذه البروتينات

على إمساك الخلايا معًا، كما هي الحال في الجلد، وتعمل كوسيلة تتواصل بها الخلايا كيميائيًّا، فتخبر بعضها متى تنقسم أو تموت أو تصنع بروتينات أخرى.

إليكم الجزء المهم: تصنيع هذه البروتينات مكلف بالنسبة للخلية؛ لأن تصنيعها وتجميعها يتطلب كمية كبيرة من طاقة الأيض. وهذا هو السبب في أنَّ الأجسام لا تستطيع أن تنشأ بدون النوع الجديد من خلايا مارجوليس. لقد جمع الاندماج الذي تصورَتْه بين مُنتِج للطاقة وصانُع للبروتين. أصبحت لدى هذه الخلية الخَيْمَر الآن الطاقة والحمض النووي اللذين يلزمان لتصنيع البروتينات المتنوعة التي مكنتها من تطوير الأجسام. وأصبح بإمكانها الارتباط بالخلايا الأخرى والتواصل معها والتصرف بطرق جديدة.

على مدار مليارات السنين، شهدنا تعاقب أفراد أكثر تعقيدًا: إن نشوء نوع جديد من الأفراد والخلية ذات العضيّات جعل من الممكن نشوء النوع التالي، وهو جسم يحتوي العديد من الخلايا.(109)

وهذا التسلسل يثير سؤالًا، كيف نشأت الأجسام؟

أمضت زميلتي في بيركلي نيكول كينج حياتها المهنية في دراسة نوع خاص من المخلوقات وحيدة الخلية. إنه مجهري وشكله مثل حبة حلوى الهلام، وله ميزة واحدة غير عادية: دائرة من الشعر تبرز مباشرة من أحد طرفيه، مثل: شعر رأس راهب مذعور. تتمتع

---

(109) للاطلاع على مدخل لنشأة الأنواع الجديدة من الأفراد، وتأثيرها في التطور، انظر كتاب التحولات الكبرى في التطور:

John Maynard-Smith and Eörs Szathmáry, The Major Transitions in Evolution (Oxford: Oxford University Press, 1998).

السوطيات القُمعية Choanoflagellates، أو القُمعيات Choanos، كما تسميها كينج بحب، بميزات خاصة. عُرف تسلسل الجينوم فيها قبل عقد، وقورن بكل من الحيوانات والمخلوقات الأخرى وحيدة الخلية. وكانت النتيجة إدراك أن القمعيات هي أقرب أقرباء الحيوانات متعددة الخلايا. وتعني هذه العلاقة أنها قد توفر أدلة على الآليات الكامنة وراء نشأة الأجسام.

فوق ذلك، تؤدي القُمعيات خدعة مهمة، فهي في معظم فترات حياتها، تسبح بحرية، وتحرك شعرها للتنقل. ثم، في أوقات محددة، كأنَّما بضغطة زر، تتحد لتشكل كتلًا. تُعرف هذه الكتل باسم الزُّهيرات لشكلها الذي يشبه الزهرة، ويمكن أن تحتوي عشرة أو أكثر من القُمعيات التي كانت منفصلة سابقًا، والتي تتصل ببعضها. الانتقال من مخلوق وحيد الخلية إلى كتلة من الخلايا المتعددة، وهو أمر استغرق مليارات السنين من التطور، يحدث في لحظة في القُمعيات.(110)

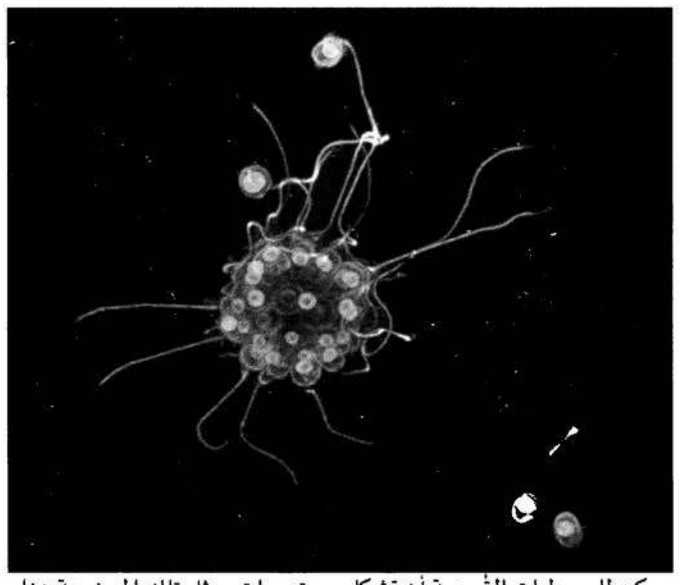
ربما كانت كينج قد تدربت كعالمة أحياء جزيئية، لكنها تفكر كعالمة حفريّات. وكما ينظر الباحثون عن الحفريّات إلى الكائنات الحية ويتساءلون عن أسلافها، فإن كينج تفعل الشيء نفسه بالنسبة للعمليات التي تُشكل الأجسام، وتتساءل: ما الآليات الجزيئية اللازمة لبناء الأجسام، ومن أين أتت؟

---

(110) محاضرة نيكول كينغ الرائعة بعنوان: "السوطيات القمعية وأصل تعدد الخلايا الحيوانية" متاحة على الإنترنت على:

Choanoflagellates and the Origin of Animal Multicellularity"

https://www.ibiology.org/ecology/choanoflagellates


يمكن للسوطيات القُمعية أن تشكل مستعمرات، مثل تلك الموضحة هنا.

إذا كانت الخلايا، كما رأينا، تصنع بروتينات خاصة لتكوين الأجسام، فإنَّ الأدلة على نشأة الأجسام ستأتي من استكشاف كيفية نشوء تلك الجزيئات. والآن يحمل الجينوم الإجابات، في وجود تسلسلات السوطيات القُمعية والبكتيريا والميكروبات المتنوعة الجاهزة للاستكشاف. وباستخدام قواعد البيانات الحاسوبية، يمكن للعلماء أن ينظروا إلى جينوم كائنٍ ما ويعرفوا بدقة البروتينات التي يمكن أن يصنّعها.

عندما عُرف تسلسل جينوم القُمعيات، كشف عن حقيقة مذهلة. فالعديد من البروتينات التي تبني الأجسام موجودة بالفعل في هذا المخلوق وحيد الخلية. وهي تستخدم البروتينات لتشكيل الزُّهيرات أو العثور على الفريسة والتهامها. دفعت هذه الملاحظة كينج

وآخرين إلى رحلة بحث أوسع، للنظر في جينوم الميكروبات المتنوعة. والنتيجة هي نمط من التطور الذي رأيناه من قبل.

اكتشفت كينج وزملاؤها أن نسخًا من البروتينات التي تستخدمها الحيوانات لبناء الأجسام، مثل: الكولاجين، والكادهيرين، والعديد من البروتينات الأخرى، موجودة في مجموعة من الكائنات وحيدة الخلية، بدءًا من البكتيريا وحتى الكائنات الأكثر تعقيدًا ذات العضيّات. ماذا يفعلون بهذه البروتينات إذا لم تكن تصنع الأجسام؟ إنهم يستخدمونها للالتصاق بالفريسة أو بأجزاء من بيئتهم. يستخدمونها لتجنب الحيوانات المفترسة. كما يمكن للمخلوقات وحيدة الخلية أن تتواصل مع بعضها باستخدام الإشارات الكيميائية. طورت الميكروبات التي كانت تحاول التكيف مع عالمها السلائف الكيميائية التي استخدمتها الحيوانات لاحقًا في تكوين الأجسام. أصبحت الحياة متعددة الخلايا ممكنة فقط؛ بسبب إعادة توظيف مجموعات جديدة من الجزيئات من وظيفتها الأصلية في الحياة أحادية الخلية. لقد سبقت الابتكارات العظيمة التي جعلت الأجسام ممكنة نشأةَ الأجسام نفسها.

اكتشفت كينج مؤخرًا الحافز وراء تكوين زُهيرة السوطيات القُمعية. عندما تجد القُمعيات نفسها في مواجهة نوع محدد من البكتيريا، فإنها تبدأ في إنتاج البروتينات التي تسبب تكتلها. نحن لا نعرف بالضبط لماذا تحفزها البكتيريا. من المحتمل أن لديها إشارة كيميائية تحفز سلوك التكتل. لكن الملاحظة مثيرة للفضول، فالكائنات وحيدة الخلية لم توفر المادة التي بُنيت منها الأجسام

فحسب، بل ربما تكون قد حفزتها أيضًا.[111]

كانت هناك حاجة للإمكانات والفرص حتى تظهر الأجسام، وقد كانت الآلية اللازمة لتكوين الأجسام موجودة منذ دهور قبل ظهور الأجسام لأول مرة في السجل الحفريّ. قبل مليار سنة، كان الأوكسجين قد صنع عالمًا جديدًا للمخلوقات المستعدة للازدهار فيه. ومع ارتفاع مستويات الأوكسجين في الغلاف الجوي، تمكنت المخلوقات التي تستخدم الأوكسجين في الأيض من أن تعيش أسلوب حياة عالي الطاقة. واستخدمت هذه الطاقة الخلايا الجديدة التي اكتشفتها مارجوليس. إنَّ القدرة على تصنيع البروتينات على المستوى الكبير اللازم لتكوين الأجسام هي شيء ممكن فقط؛ لأن الخلايا تمتلك محطات طاقة يغذيها الأوكسجين. وقد كان الوقود وفيرًا قبل مليار سنة.

مجموع الأجزاء:

يشبه تنظيم الأجسام إلى حدٍّ كبير الدمى الروسية، حيث تحتوي الأجسام أعضاء مؤلفة من أنسجة مؤلفة من خلايا تحتوي عضيّات، وكلها تحتوي جينات بداخلها. على مدى مليارات السنين من عمر

(111) للاطلاع على الأبحاث على السوطيات القُمعية، انظر:

T. Brunet and N. King, "The Origin of Animal Multicellularity and Cell Differentiation," Developmental Cell 43 (2017): 124–40; S. R. Fairclough et al., "Multicellular Development in a Choanoflagellate," Current Biology 20 (2010): 875–76; R. A. Alegado and N. King, "Bacterial Influences on Animal Origins," Cold Spring Harbor Perspectives in Biology 6 (2014): 6:a016162; and D. J. Richter and N. King, "The Genomic and Cellular Foundations of Animal Origins," Annual Review of Genetics 47 (2013): 509–37.

التطور، تخلت الأجزاء المختلفة في الأساس عن فرديتها لتصبح أجزاء من كل أكبر. اجتمعت الميكروبات الحرة لتكوين نوع جديد من الخلايا. وكانت لتلك الخلايا الجديدة سمات خاصة سمحت بنوعٍ جديد من الاندماج، وهي الأجسام متعددة الخلايا، وقد ظهرت على التوالي أنواع أكثر تعقيدًا من الأفراد بأجزاء مُتزايدة التعقيد.

تعتمد الأجسام والخلايا على السلوكيات المحكومة بشدة للأجزاء المؤلفة لها. ولكن تحت هذا النظام يكمن النشاز. إنَّ تنسيق بين الأجزاء في الجسم يعني توفيق المصالح المتنافسة التي تكمن في الخلايا وفي أجزاء الجينوم المختلفة.

تتكاثر الجينات والعضيّات والخلايا المختلفة داخل الأجسام باستمرار، وإذا تُركت دون رقيب، يمكن لجزءٍ واحد منها أن يُسيطر. الصراع بين الأجزاء التي تتصرف بأنانية، وتحاول التكاثر دون رادع، وبين احتياجات الجسم هو قصة: الصحة، والمرض، والتطور، كما يمكن أن تكون النتيجة أُمًّا للابتكار أو طريقًا إلى الكارثة.

تخيل خلية تتصرف من تلقاء نفسها، وببساطة تنقسم وتتكاثر باستهتار كبير، أو على العكس، لا تموت في الوقت أو المكان المناسبين. يمكن لخلايا مثل هذه أن تسيطر على الجسم وتحطمه.

في الواقع، ذلك هو بالضبط ما يفعله السرطان: تكسر الخلايا السرطانية القواعد وتعمل بأنانية، فلا تُنسّق تكاثرها أو موتها مع احتياجات الفرد الذي تعيش فيه.

يكشف السرطان عن توتر أساسي بين الأجزاء والكل، وفي حالتنا، بين المكونات التي تشكل الأجسام والأجسام نفسها. إذا تصرفت الأجزاء وفق مصلحتها الذاتية على المدى القصير، وانقسمت دون رادع، فقد تؤدي إلى انهيار الجسم. السرطان هو مرض ناتج عن طفرات جينية تتراكم وتتسبب في تكاثر الخلايا بسرعةٍ كبيرة أو عدم موتها بشكل صحيح. واستجابة لذلك، طورت الأجسام دفاعات، مثل: الاستجابات المناعية التي تقتل الخلايا التي تسيء التصرف. وعندما تنهار نقاط التفتيش والدفاعات هذه في النهاية ويخرج سلوك الخلايا عن السيطرة، يصبح السرطان مُميتًا.

يحتدم صراع مماثل داخل الجينوم. جينات باربرا مكلينتوك القافزة موجودة لعمل نسخ من نفسها، مثلما تتصرف الخلية السرطانية.

تدور الحرب في الداخل بين عناصر أنانية مارقة تريد أن تجمح في تكاثرها وبين الفرد الحي. وفي وجود الجينات الساعية لاحتواء العناصر الأنانية، والأوبئة الغازية باستمرار، وتريليونات الخلايا التي تعمل معًا للحفاظ على وظائف الجسم، فإنَّ الأجسام متعددة الخلايا هي اتحاد من الأجزاء التي نشأت في أوقات مختلفة، وأحيانًا في أماكن مختلفة.

تلك الأجزاء، بعضها في صراع، وبعضها متعاون، وكلها تتغير بمرور الوقت، تغذي نار التطور. تستطيع الأجسام أن تتطور وتتنوع بطرق جديدة؛ بسبب تعدد أجزائها وطرق تفاعلها.

علم المزج:

كانت العجلات موجودة على كوكب الأرض منذ حوالي ستة

آلاف سنة، وكانت الحقائب موجودةً منذ قرون. وابتُكرت الحقائب ذات العجلات منذ بضعة عقود، وغيَّرت حياة الكثير من المسافرين. في كل مرة أذهب إلى المطار، أعجب من أنَّ الابتكار الثوري يمكن أن يأتي من إيجاد اندماج جديد.

كشفت عضيّات مارجوليس حولَ قوة الدمج مصدرًا للابتكار في العالم الطبيعي. ماذا لو لم تخترع السلالة شيئًا ما بنفسها، بل اكتسبت بدلًا من ذلك سمة نشأت في نوع آخر؟ إنَّ الميتوكوندريا التي تزود خلايانا بالطاقة لم تُبتكر عن طريق تغييرات في جينوم خلايانا، عندما كان أسلافنا مخلوقات وحيدة الخلية. لقد ابتُكرت في مكانٍ آخر، ثم أُخذت وأُعيد توظيفها عندما اندمجت تلك البكتيريا القديمة مع سلالتنا. وبالمثل، فإن الأوبئة، خلال ملايين السنين من إصابة الجينوم، أتاحت له القدرة على صنع بروتينات جديدة. وعندما أُعيد توظيف هذه الأوبئة، ظهرت جزيئات جديدة للمساعدة في الحمل والذاكرة.

يمكن أن تظهر السمات في أحد الأنواع، ثم يستعيرها، أو يسرقها، أو يعدلها نوع آخر لاستخدامات جديدة. قد يرث المضيفون ابتكارًا جاهزًا بدلًا من الاضطرار إلى بنائه بأنفسهم.

إنَّ الدمج بين الأجزاء والأنواع الجديدة من الأفراد التي يمكن أن تنشأ منها، يمكن أن يخلق فرصًا تطورية.

لمليارات السنين، كانت الحياة موجودة في صورة خلايا مفردة، ثم حدثت الابتكارات في الطرق التي تمثّل بها الكائنات الطاقة والمواد الكيميائية المحيطة بها. كانت الحياة صغيرة.

ثم أدى ظهور أفراد أكثر تعقيدًا إلى ظهور طرق جديدة لصنع: البروتينات، والتنقل، والتغذية. تُعد الكائنات ذات الأجسام – الحيوانات، والنباتات، والفطريات – من الوافدين الجدد نسبيًّا على الكوكب، وتتألف جميعها من خلايا مشتقة من اندماج أفراد مختلفين. لقد فتح ظهور الأجسام طريقًا جديدًا للتطور. تستطيع المخلوقات المؤلفة من العديد من الخلايا التي تمنحها العضيّات الطاقة أن تكبر وتبني أنسجة وأعضاء جديدة. والنتيجة هي تنوع الأنسجة والأعضاء التي تساعد الحيوانات في الطيران إلى أعلى الارتفاعات، والسباحة في أعماق المحيطات، وابتكار أقمار صناعية لاستكشاف أقصى حدود النظام الشمسي.

احتلال المستقبل:

لقد كان الدمج بين التقنيات والابتكارات من الأنواع الأخرى واستعارتها وإعادة توظيفها هو ما فعلناه في ماضينا منذ مليارات السنين. وهو أيضًا جزء من مستقبلنا.

في عام 1993، كان عالم الأحياء الدقيقة الإسباني فرانسيسكو موخيكا يدرس المستنقعات المالحة في كوستا بلانكا، في جنوب إسبانيا. وكان هدفه فهم كيفية تطور البكتيريا لتزدهر في بيئة شديدة الملوحة. كان ثمة شيء ما في الجينوم يمنحها مقاومة للبيئة التي تموت فيها معظم الأنواع. وفيما يقارب عقدًا من تقفي سلسلة من الأدلة، توصل إلى تسلسل الجينوم فيها وكشف عن ميزة محيرة. كان معظم حمضها النووي عبارة عن تسلسل بكتيري قياسي من الأحرف المختلفة. لكن عددًا صغيرًا من الأماكن كان بها امتداد قصير يشكل

متواليات متناظرة، تُقرأ بنفس الطريقة من الجهتين، مثل: اسم HANNAH، لكن في هذه الحالة تكون الحروف هي ATGC. علاوة على ذلك، تبتعد كل مجموعة قصيرة واحدة من المتناظرات مسافة متساوية عن الأخرى، ما يشكل نمطًا متكررًا: متناظرة، مسافة من التسلسلات الأخرى، ثم متناظرة، ومسافة أخرى من التسلسلات.

في الواقع، وفي مثال على المتكررات في العلم، تعرّف مختبر ياباني على تلك التسلسلات المتناظرة قبلها بعقد تقريبًا.

ظنًا منه أن هذا ليس حدثًا عشوائيًّا، بحث موخيكا في البكتيريا الأخرى عن هذا النمط الغريب. ويا للدهشة! وجدها شائعة للغاية، وتظهر في أكثر من عشرين نوعًا. لا بد أن مثل هذا النمط الجيني المحدد جيدًا والواسع الانتشار له وظيفة، ولكن ما عساها تكون؟

عند تلك المرحلة، كان موخيكا قد بدأ مختبره الخاص في إسبانيا، لكنه كان يفتقر إلى المال الكافي لإجراء التسلسلات أو أي عمل مختبري عالي التقنية. ولم يثنه ذلك، فاستخدم حاسوبه المكتبي، وبعض برامج معالجة النصوص، واتصالًا بالإنترنت يوصله بقاعدة بيانات جينية، ثم أدخل تسلسل المتناظرات ومساحات التسلسلات التي تفصل بينها ليرى في أي مكان آخر قد يجدها. وقد وجد نتائج، لكنها لم تكن في بكتيريا أخرى. أفضل شبيه لها على الإطلاق كان في وباء. وفوق ذلك، كان الوباء أحد الأوبئة التي طورت هذه الأنواع من البكتيريا مقاومة له. وواصل العمل الشاق، وهو يبحث في ثمانية وثمانين منطقة فاصلة تفصل بين المتناظرات. كان أكثر من ثلثيها

يتوافق مع الأوبئة التي كانت البكتيريا مقاومة لها. بدا كما لو أن تلك المناطق تحمي البكتيريا من الغزو الوبائي.

قدم موخيكا فرضية جريئة لم تُختبر مفادها: إن ذلك النظام من المسافات الفاصلة والمتناظرات هو سلاح بكتيري ضد الأوبئة. وكتب فكرته وقدمها إلى بعض المجلات الرائدة. رفضتها إحداها حتى دون إرسالها لتقييم الأقران. وأعادتها أخرى لافتقارها إلى: «الجِدّة أو الأهمية». تكررت هذه العملية خمس مرات حتى انتهت الورقة في مجلة للتطور الجزيئي. وفي نفس العام، نشر مختبر في فرنسا، باستخدام طرق مختلفة قليلًا، نفس الفكرة بشكل مستقل.

ثم دخلت شبكة من المختبرات الأخرى على الخط في عملية البحث، فوجود الدفاعات البكتيرية سيكون بمثابة نعمة على صناعة الزبادي التي تعاني مزارع البكتيريا لديها من الغزاة الوبائيين. وفي وجود هذا الحافز، سرعان ما تبين بشكل مقنع أن هذا النظام تطور في سباق تسلح مع الأوبئة. تهاجم الأوبئة البكتيريا مثل البشر. ونحن نقاوم معظمها باستخدام جهازنا المناعي. هذه الآلية البكتيرية تمنح البكتيريا نوعًا من المناعة، فهي تستخدم دليلًا جزيئيًّا ومشرطًا، كما تساعد المتناظرات في تكوين الأدلة التي تستدعي مشرطًا جزيئيًّا لقطع الحمض النووي الوبائي وجعله غير ضار. إنه دفاع ضد طبيعة الأوبئة الأنانية في إصابة جينوم الآخر وتقسيمه والاستيلاء عليه.

بعد هذه الاكتشافات، أجرى عدد من المختبرات حول العالم أبحاث مبدعة ورائدة على المشرط الجزيئي (المعروف باسم كاس9، Cas9) توضح كيف أنه من الممكن إعادة توظيف هذا النظام ليس

فقط لتحرير الحمض النووي الوبائي، ولكن الحمض النووي لأي مخلوق. قُدمت الأوراق إلى المجلات العلمية في حوالي أشهر من بعضها، وكانت تصف طرق تعديل النظام البكتيري لاستخدامه على الأنواع الأخرى. هذه التقنية، المعروفة باسم كريسبر- كاس (التي رأينا نيبام باتل يستخدمها لتغيير مكان أطراف البارهيال)، هي الأساس لتحرير الجينوم، وهي آلية مألوفة الآن يمكنها تحرير جينوم النباتات والحيوانات والبشر لتحقيق أغراض متنوعة من الزراعة إلى الصحة. وتلك هي البداية فقط: إذ يجري تطوير تقنيات محسّنة أدق وأسرع وأكفأ كل شهر تقريبًا.[112]

تستطيع هذه التقنية إعادة صياغة أجزاء من الجينوم بين عشية وضحاها. في التاريخ التطوري، استغرق حدوث تلك الأنواع من التغيرات ملايين السنين. وعلى الرغم من أن التقنيّة لا تزال في بداياتها الأولى، وأن الأخبار غالبًا ما تحمل مبالغات، فمن الواضح أنه يمكننا إعادة صياغة أجزاء من جينوم النباتات والحيوانات بسرعة وبتكلفة زهيدة. ولقد طبقنا في مختبري هذه التقنية على الأسماك، باستخدام التطبيق الأبسط لها، أي: حذف الجينات. في حين تستطيع مختبرات أخرى قص أجزاء كاملة من الجينوم ولصقها، ونقل الجينات ومفاتيحها من نوعٍ إلى آخر، أو من فرد إلى آخر.

---

(112) للاطلاع على كتاب تمهيدي جيد عن تحرير الجينوم بتقنية كريسبر-كاس، بما في ذلك تاريخه، شارك في كتابته أحد روادها انظر:

Jennifer Doudna and Samuel Sternberg, A Crack in Creation: Gene Editing and the Unthinkable Power to Control Evolution (New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2017).

إن اكتشاف تحرير الجينوم بتقنية كريسبر-كاس يتبع مسارًا متكررًا تبعه الابتكار التطوري لأربعة مليارات سنة. فلم يحدث الفتح العلمي الذي أدى إلى الثورة التقنيّة في المكان الذي نربطه به، أي: تحرير الجينوم في الحيوانات والنباتات، ولكن في مكان مختلف – وهو فهم النظم البيئية في المياه المالحة. وما تلا ذلك كان طريقًا متشابكًا من الاكتشافات، حيث طور العديد من المخترعين أفكارًا متماثلة في نفس الوقت، وجمعوا بين التقنيات، وتنفسوا جميعًا هواء الاكتشاف ذاته. وكما هي الحال في الابتكارات البيولوجية، جاءت اللحظة الحاسمة من إعادة توظيف ابتكار أحد الأنواع، وهي البكتيريا، ليستخدمه نوع آخر، وهو نحن أنفسنا. لقد شمل تطوير كريسبر-كاس مئات من كبار العلماء وصغارهم الذين عملوا بالتوازي. إن غرابات التاريخ، والمتكررات، والعديد من السوابق غير المتوقعة تجعل هذه القصة مثالية لأحد أنواع الكائنات – وهم المحامون، فمعارك براءات الاختراع توجد في قلب محاولة فهم تاريخ كريسبر-كاس.

ثمة شيء سامٍ في فكرة أنَّ دماغنا الواعي قد حقق ما كانت تفعله الخلايا والجينوم بمفردهما منذ مليارات السنين. لقد أُخذت التقنيّة التي ابتكرها أحد الكائنات، وهو البكتيريا، وعُدلت واستُغلت لتغيير كائنات أخرى.

إنَّ الدماغ الذي استولى على هذه الابتكارات البيولوجية وعدّلها يتكون هو ذاته، جزئيًّا، من بروتينات وبائية معاد استخدامها لأغراض أخرى، وتمنحه الطاقة بكتيريا كانت تعيش حرة في

السابق، فالتوليفات الجديدة يمكنها تغيير العالم.



الخاتمة

في يوم عيد الميلاد عام 2018، كنت متحصنًا في خيمتي معظم فترة الصباح؛ بسبب عاصفة ثلجية صيفية. وعندما تحسن الطقس، تسلقت حافة جبلية فوق المخيم لأمدد ساقيّ. كنت أشعر بحرية أكبر مع كل خطوة، ووجدت نفسي في النهاية على قمة جبل ريتشي، أحد قمم سلسلة جبال القارة القطبية الجنوبية.[113] كانت تحيطني هضبة من الجليد أكبر من مساحة الولايات المتحدة القارية. وكان فريقنا قد نقل بحثنا عن الحفريّات إلى صخور أقدم من تلك التي كانت تحتوي على السَّمكة ذات الأقدام تيكتاليك روزي Tiktaalik roseae قُرب القطب الشمالي. هنا، على الجانب الآخر من الكوكب، كان بحثنا ينصبُّ على بعض أقدم الأسماك ذات الهياكل العظمية. وكانت الصخور من النوع والعمر المناسبين التي يمكن العثور فيها على مثل تلك الحفريّات هي التي أوصلتنا إلى الجبال في هذا الجزء من القارة القطبية الجنوبية.

هنا، تبرز قمم الجبال من وسط الأنهار الجليدية، لتكشف عن طبقات من الألوان التي تشكل تباينًا نابضًا بالحياة مع بحر الأبيض المحيط بها. طبقة تلو طبقة من: الأحمر، والبني، والأخضر تحمل

(113) يقع جبل ريتشي في أرض فيكتوريا في القارة القطبية الجنوبية. كنا هناك كجزء من مشروع برنامج القطب الجنوبي الأمريكي بتمويل من منحة مؤسسة العلوم الوطنية رقم 1543367.

400 مليون سنة من تاريخ الحياة والكوكب.

تُظهر التراكيب الموجودة داخل الصخور أنَّ هذه المنطقة القطبية كانت ذات يوم دلتا استوائية عملاقة بحجم نهر الأمازون، ثم أصبحت فيما بعد موضعًا لنشاط بركاني مكثف. لقد تغيرت الحياة هنا أيضًا. يبلغ عمر الصخور الموجودة في الأسفل حوالي 400 مليون سنة، وتحتوي في الغالب أسماكًا، بينما يبلغ عمر الصخور الموجودة في الأعلى 200 مليون سنة، وتحتوي أنظمةً بيئية بها مجموعة متنوعة من الزواحف.

وعند النظر إليها من تلك المسافة، يصبح من المغري أن نبحث في تلك الطبقات، ونتصور تقدمًا منظمًا للتغير التطوري. وعلى هذا المقياس العالمي، تقع الطبقات التي تحتوي الميكروبات الأولى أسفل تلك التي تحتوي أقدم الحيوانات، وتقع الطبقات التي تحتوي الأسماك الأولى تحت تلك التي تحتوي البرمائيات، وتقع الطبقات التي تحتوي البرمائيات الأولى أسفل تلك التي تحتوي الزواحف، وهكذا.

إننا نميل إلى ملء الفجوات في المعرفة بتحيزاتنا التي عادة ما تكون مزيجًا من: الأمل، أو الترقُّب، أو الخوف. تميل عقولنا إلى تكوين صورة للأحداث الماضية؛ بهدف بناء قصة تؤدي فيها إحدى التغيرات إلى التغير الذي يليه في تسلسل خطي. لقد رأينا جميعًا رسومًا كاريكاتورية عن تطور الإنسان تُظهر مسيرة تمتد من القردة إلى القردة العليا إلى البشر، تبدأ من مخلوقات محنية على أربع أرجل إلى تلك التي تمشي على رجلين. وكثيرًا ما يكون ذلك الرسم ساخرًا،

حيث تكون نهاية التطور إنسانًا جالسًا على الأريكة يشاهد مسلسل عائلة سمبسون أو ملتصقًا بهاتفه. هذه النظرة للتاريخ مترسخة بعمق. كم مرة سمعت مصطلح **«الحلقة المفقودة»**، كما لو أن هناك سلسلة كبيرة من التطور تؤدي فيها إحدى الحلقات حتمًا إلى الحلقة التالية، أو أن الروابط المفقودة يجب أن تبدو كأنها مزيج دقيق من سمات الأسلاف والأحفاد؟

صحيح أنَّ الأسماك الأولى ظهرت قبل المخلوقات الأولى التي عاشت على اليابسة في السجل الحفريّ. ولكن كما رأينا، كلما نظرنا إلى: الحفريّات، والأجنّة، والحمض النووي للأنواع المختلفة، وجدنا أن العديد من التغييرات التي سمحت للحيوانات بالعيش على اليابسة ظهرت في وقتٍ سابق، بينما كانت الأسماك تعيش في الماء. كل الثورات الكبرى في تاريخ الحياة تبعت نفس المسار. لا شيء يبدأ أبدًا في الوقت الذي نعتقد أنه بدأ فيه، فالأسلاف ظهروا في وقت أسبق وفي أماكن تختلف عما نتخيله. وكما عرف داروين عندما رد على سانت جورج جاكسون ميفارت قبل أكثر من 150 عامًا، فإن تاريخ الحياة لم يكن ليحدث بأي طريقة أخرى.

لم يعلم داروين بالحمض النووي، أو بآلية عمل الخلية، أو كيف تبني الوصفات الجينية الأجسامَ في أثناء التطور الجنيني.

إن الحمض النووي، وهو دائم الالتواء والالتفاف ودائم الحرب مع نفسه ومع الغزاة الخارجيين، يوفر الوقود لتغيرات التطور.

10٪ من الجينوم فينا جاءت من أوبئة قديمة، و60٪ أخرى على الأقل تتألف من عناصر متكررة صنعتها الجينات القافزة الجامحة.

2٪ فقط هي جينات تخصنا. ومع اندماج الخلايا والمواد الجينية للأنواع المختلفة ونسخ الجينات وإعادة توظيفها بشكلٍ مستمر، فإن تاريخ الحياة يتدفق مثل نهر مجدول ومتعرّج أكثر من كونه قناة مستقيمة. تشبه الطبيعة الأم الخباز الكسول الذي يصنع مجموعة متنوعة محيرة من الخلطات عن طريق: إعادة استخدام الوصفات، والمكونات القديمة، ونسخها، وتعديلها، وإعادة ترتيبها. وبهذه الطريقة، ومن خلال دهور التعديلات المتسرعة والاستنساخ والاختيار، تطورت الميكروبات وحيدة الخلية إلى النقطة التي أصبح فيها نسلها يزدهر في كل موطن على هذا الكوكب، حتى أنه سار على القمر.

أعود بين الحين والآخر إلى الرسمة التي بدأت مسيرتي قبل ثلاثة عقود: صورة سمكة يصلها سهم بحيوان برمائي. يبدو ذلك الآن طريفًا، وحتى ساذجًا. تجسّد تلك الرسمة علم الأحياء التطوري في وقت قبل أن نعرف الكثير عن الجينوم، أو الغزاة الوبائيين، أو الجينات التي تبني الأجسام. لم نكن نعرف شيئًا عن السَّمكة ذات الأطراف التي اكتشفناها أنا وزملائي في عام 2004، ولا عن أي حفرة من الحفريّات الأخرى المكتشفة مؤخرًا التي تخبرنا عن أحداث رئيسة أخرى في تاريخ الحياة. نحن اليوم نمارس علمًا لم نكن نحلم به قبل عقود قليلة فقط. ومثل تاريخ الحياة، تمتلئ الاكتشافات العلمية بـ: التحولات، والمنعطفات، والطرق المسدودة، والفرص غير المتوقعة التي تغير الطريقة التي نرى بها العالم من حولنا. إنَّ الأفكار التي نستخدمها لاستكشاف تنوع الطبيعة هي في ذاتها إعادة

توظيف وتعديل لتلك التي طورها أسلافنا منذ عقود، إن لم يكن منذ قرون.

كتب الشاعر ويليام بليك: أن ترى «الكون في حبة رمل والسماء في زهرة برية»، إنك عندما تعرف كيف تنظر، يمكنك أن ترى فعل مليارات السنين في: الأعضاء، والخلايا، والحمض النووي في جميع الكائنات الحية، وأن تُقدّر الروابط التي تصلنا ببقية أشكال الحياة على هذا الكوكب.

لمزيد من القراءة:

يتوافر عدد من المقدمات العامة الممتازة لتاريخ الحياة والكوكب. ريتشارد فورتي، عالم الحفريّات البارع والكاتب الموهوب، له كتابان شاملان: **الحياة: التاريخ الطبيعي للأربعة مليارات سنة الأولى من الحياة على الأرض** (New York: Vintage، 1999) و**الأرض: تاريخ مفصل** (New York: Vintage، 2005). درس ريتشارد دوكينز شجرة الحياة بطريقة عكسية، ثم روى كيف تغيرت الأنواع بمرور الوقت ووصف الأدوات التي نستخدمها لإعادة بناء ذلك التاريخ في **حكاية الأسلاف: رحلة حج إلى فجر التطور** (New York: Mariner Books، 2016). من الموارد الجذابة والغنية بالمعلومات عن تاريخ الحياة الأولى آندرو نول، **الحياة على كوكب يافع: أول ثلاثة مليارات سنة من التطور على الأرض** (Princeton، NJ: Princeton University Press، 2004)، نيك لين، **السؤال الهام: الطاقة، والتطور، وأصول الحياة المركبة** (New York: Norton،

2015)؛ وويليام شوبف، مهد الحياة: اكتشاف أقدم الحفريّات على الأرض (Princeton، NJ: Princeton University Press، 1999).
للاطلاع على تاريخ حي وشامل للسجل الأحفوري، راجع بريان سويتيك، **محفور في الصخر: التطور، السجل الأحفوري، وموقعنا من الطبيعة** (New York: Bellvue Literary Press، 2010).

في السنوات القليلة الماضية، ظهر عدد من الكتب العامة الممتازة عن علم الجينات والوراثة، ما يشبه إلى حدٍّ ما المتكررات في السجل التطوري: سيدهارتا موخيرجي، **الجين: تاريخ مفصل** (New York: Scribner، 2017)، وآدم رذرفورد، **تاريخ موجز لكل من عاش قاطبة: قصة الإنسان كما تحكيها جيناتنا** (New York: The Experiment، 2017)، وكارل زيمر، **البنت لأمها: قوة الوراثة وانحرافاتها وإمكاناتها** (New York: Dutton، 2018).

للاطلاع على وصف أخّاذ للتطور الجزيئي والعديد من الأفكار الجديدة الناتجة عنه، انظر ديفيد كويمن، **الشجرة المتشابكة: تاريخ جديد بالكلية للحياة** (New York: Simon and Schuster، 2018).

المؤلف في سطور

نيل شوبين هو مؤلف كتاب: **«الكون الذي بداخلنا»**، وكتاب **«السّمكة التي بداخلك»** الأكثر مبيعًا الذي اختارته الأكاديمية الوطنية للعلوم كأفضل كتاب لعام 2009.

تدرب في: كولومبيا، وهارفارد، وجامعة كاليفورنيا في بيركلي.

شوبين هو العميد المشارك للعلوم البيولوجية في جامعة شيكاغو.

وفي عام 2011 انتُخب لعضوية الأكاديمية الوطنية للعلوم.

حقوق الصور

جميع الأشكال ما لم يذكر خلاف ذلك هي ملكية عامة.

1 © Kalliopi Monoyios

2© The Metropolitan Museum of Art; used with permission

3Deinonychus © Paul Heaston, used with permission;
silhouette © Kalliopi Monoyios

4 From F. M. Smithwick, R. Nicholls, I. C. Cuthill, and J. Vinther (2017), "Countershading and Stripes in the Theropod Dinosaur Sinosauropteryx Reveal Heterogeneous Habitats in the Early Cretaceous Jehol Biota" (http://www.cell.com/currentbiology/fulltext/S0960-9822(17)31197-1), Current Biology. DOI:10.1016/j.cub.2017.09.032 (https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.09.032), used under CC BY 4.0 International

5 Scott Polar Research Institute, University of Cambridge; used with permission

6 From Walter Garstang, Larval Forms and Other Verses

7© Kalliopi Monoyios

8© Kalliopi Monoyios

9Courtesy of Stanford University's Hopkins Marine Station

10© Kalliopi Monoyios

11 By Marc Averette, used under CC BY 3.0 Unported

12© Kalliopi Monoyios

13© Kalliopi Monoyios

14© 2011 Wolfgang F. Wülker, from W. F. Wülker et al., "Karyotypes of Chironomus Meigen (Diptera: Chironomidae)Species from Africa," Comparative Cytogenetics 5(1): 23–46, https://doi.org/10.3897/compcytogen.v5i1.975, used under CC BY 3.0

15 From the archives of the Smithsonian Institution; used with

permission

16© Kalliopi Monoyios

17 Image by Howard Lipschitz, reprinted with kind permission of Springer Nature, The Netherlands

18© Kalliopi Monoyios

19© Kalliopi Monoyios

20© Kalliopi Monoyios

21© Kalliopi Monoyios

22 Andrew Gehrke and Tetsuya Nakamura, University of Chicago

23 Courtesy of City of Hope Archives; used with permission

24 Courtesy of Barbara McClintock Collection at Cold Spring Harbor Laboratory; used with permission

25 Courtesy of Vincent J. Lynch; used with permission

26 Color lithograph after Sir L. Ward, Wellcome Library, London, used under CC BY 4.0

27 Courtesy of David Wake; used with permission

28© Kalliopi Monoyios

29 Gayani Senevirathne, University of Chicago; used with permission

30© Kalliopi Monoyios

31 Courtesy of Boston University Photography; used with permission

32© Kalliopi Monoyios

33 Courtesy of Nicole King; used with permission



نيل شوبين





من اكتشاف الأسماك التي تتنفس الهواء في حملة نابليون على مصر، والسمندل الذي يستطيع أن يوقف نموَّه في المرحلة التي تناسبه، والذبابة التي تحمل رِجلًا في رأسها، إلى الجينات المتمردة، والفيروسات المُدجّنة، والبكتيريا الأسيرة، كلها من عجائب الطبيعة التي يصفها هذا الكتاب بروعة ويربط بينها في تاريخ طويل مَهيب للحياة على هذا الكوكب. إن نظرية التطور هي على الأرجح النظرية الأكثر إثارة للخلاف في تاريخ العلم كله. يستميت الكثيرون في الدفاع عنها ويندفع غيرهم في محاولة نسفها. وبين هؤلاء وأولئك تبقى النظرية ذاتها، كأي نظرية علمية، موقوفة على الاكتشاف والتجربة اللذان يُثبتان أو يدحضان ما تأتي به. فلا دفاع المدافعين ولا كراهية المبغضين يغيران من العلم شيئًا، فالعلم الحق المتجرد لا ينحاز، ولا يحابي. تأتي أهمية هذا الكتاب في كونه يستعرض تطور الفكرة والأدلة عليها والأدلة ضدها بقلم واحد من العلماء الذين أسهموا في مسار تلك النظرية. إنه حديثٌ عن العلم أكثر منه حديثٌ عن الخلاف. وهذه هي السبيل لإنتاج العلم الحق، لا علم الأهواء الذي لا يصمد في تيار الزمن. إن الكائن الحيّ مُعجز بكل تفاصيله، وإن وجود الحياة ذاتها أكبر إعجازًا. ولإدراك معنى كل ذلك ينبغي أن ينظر المرء إلى أصغر الخلايا والجزيئات، وأن ينظر أيضًا إلى تاريخ الحياة بجملتها، في آماد من الزمن تتجاوز عمر الإنسانية ووجودها.


WWW.PAGE-7.COM
ISBN: 978-603-8387-86-3
9 786038 387863

Designed by Tawfiq Omrane

صفحة 7